



**Joana Mónica Martins da Cruz**  
Licenciada em Engenharia Geológica

## **Abordagem às soluções de contenção de escavações usando a técnica *Deep Soil Mixing***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Geológica-Geotecnia

Orientador: Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo,  
Professor Auxiliar Convidado, FCT/UNL

### **Júri**

**Presidente:** Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

**Vogais:** Doutora Ana Paula Confraria Varatojo, Prof. Auxiliar – FCT/UNL  
Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo, Prof. Auxiliar  
Convidado – FCT-UNL



**Dezembro de 2012**



**Joana Mónica Martins da Cruz**  
Licenciada em Engenharia Geológica

**Abordagem às soluções de contenção de  
escavações usando a técnica *Deep Soil  
Mixing***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Geológica-Geotecnia

Orientador: Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo,  
Professor Auxiliar Convidado, FCT/UNL

**Júri**

**Presidente:** Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

**Vogais:** Doutora Ana Paula Confraria Varatojo, Prof. Auxiliar – FCT/UNL  
Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo, Prof. Auxiliar  
Convidado – FCT-UNL



**Dezembro de 2012**

Copyright © Abordagem às soluções de contenção de escavações usando a técnica Deep Soil Mixing. Joana Mónica Martins da Cruz, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de outra forma digital, ou por qualquer meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua própria cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## Agradecimentos

Este documento é a finalização de um percurso académico, resultado de horas de estudo e trabalho, o qual não seria possível ser concretizado sem o apoio e colaboração de diversas pessoas a quem expresso o meu sincero agradecimento:

- \* Ao Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo, pela orientação, acompanhamento, revisão e crítica deste trabalho;
- \* À Doutora Ana Paula Silva, pelo conhecimento e conselhos transmitidos, pela amizade e incentivo incondicional ao longo destes anos, que me permitiram acreditar nas minhas capacidades;
- \* Ao Doutor Pedro Lamas, pela amizade e disponibilidade;
- \* Ao Doutor Fernando Pinho e à Doutora Paula Varatojo, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas;
- \* À Doutora Zenaide Silva, pelos ensinamentos, amizade e carinho de sempre;
- \* A todos os meus colegas e amigos, Patrícia Amaral, Raquel Martinho, Rute Gomes, Rui Almeida, Nádia Gonçalves, Mário Cândido Pedro Fernandes e Bruno Fonseca que, de certa forma, me acompanharam neste percurso e contribuíram para concretização deste trabalho;
- \* À Olinda, ao João e à Telma, pela admiração, amizade e carinho demonstrados ao longo destes anos, tornando-se uma segunda família;
- \* Ao Alberto, pela paciência e carinho, mas sobretudo por me fazer acreditar que tudo é possível, em particular, nos momentos mais difíceis e atribulados;
- \* Ao meu Irmão, pela grande e maravilhosa cumplicidade, apoio e incentivo;
- \* Ao meu Pai e à minha Mãe, pelo apoio incondicional e sacrifícios feitos para poder fazer todo este percurso, sendo eles as pontes e pilares seguros em todas as minhas travessias.

A todos eles, o meu mais profundo e sincero OBRIGADA!

***Aos meus Pais***



## Resumo

O *Deep Soil Mixing* é uma técnica de melhoramento de terrenos com inúmeras aplicações, que tem tido grande evolução nos últimos anos. A presente dissertação aborda alguns aspetos gerais desta técnica, dando ênfase às características dos tipos de mistura feitos com vários solos e quantidades de ligante (especialmente o cimento). É feita uma síntese sobre os aspetos técnicos do *Deep Soil Mixing* e uma análise aos parâmetros geotécnicos da mistura solo-ligante. Faz-se ainda um enquadramento da técnica como solução de contenção, referindo o seu processo construtivo. Por fim, abordam-se alguns aspetos relativos ao dimensionamento de cortinas de contenção executadas recorrendo ao *Deep Soil Mixing*.

**Palavras-chave:** Melhoramento de terrenos; *Deep Soil Mixing*; solo-cimento; contenção de escavações.





## **Abstract**

Deep Soil Mixing is a ground improvement technique with several applications that has evolved over time. This dissertation addresses to some general aspects of this technique, emphasizing the characteristics of mixtures made with various amounts of soil and binder (especially cement). A summary of the technical aspects of Deep Soil Mixing, and an analysis of the geotechnical parameters of the soil-binder mixture is presented. The technique is analysed as a solution for excavation support referring its construction process. Finally, the main aspects of the design of Deep Soil Mixing walls are presented.

**Key words:** ground improvement; *Deep Soil Mixing*; soil-cement; excavation support.



## Índice de texto

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2	OBJETIVO	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
<b>2</b>	<b>AS TÉCNICAS DE SOIL MIXING</b>	<b>5</b>
2.1	PERSPETIVA GLOBAL E CONCEITOS	5
2.2	BREVE HISTÓRICO	6
2.3	DOMÍNIO DE APLICAÇÃO	8
2.3.1	<i>Reforço de fundações</i>	12
2.3.2	<i>Cortinas de impermeabilização</i>	12
2.3.3	<i>Sistemas de contenção</i>	13
2.3.4	<i>Mitigação da liquefação</i>	14
2.3.5	<i>Remediação ambiental</i>	15
2.4	APLICABILIDADE	15
2.5	EXECUÇÃO	16
2.5.1	<i>Materiais</i>	16
2.5.2	<i>Procedimento e equipamentos</i>	17
2.6	VANTAGENS E LIMITAÇÕES	27
2.7	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA	29
<b>3</b>	<b>PROPRIEDADES DA MISTURA SOLO-LIGANTE</b>	<b>31</b>
3.1	GENERALIDADES	31
3.2	LIGANTES	31
3.2.1	<i>Seleção do ligante</i>	31
3.2.2	<i>Cal</i>	34
3.2.3	<i>Cimento</i>	35
3.2.4	<i>Aditivos</i>	37
3.3	PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO	38
3.3.1	<i>Propriedades físicas e químicas</i>	38
3.3.2	<i>Resistência e deformabilidade</i>	42
3.3.3	<i>Permeabilidade</i>	47
3.3.4	<i>Durabilidade</i>	49
<b>4</b>	<b>CONTENÇÕES DE ESCAVAÇÕES</b>	<b>51</b>
4.1	TIPOS DE CONTENÇÕES CONVENCIONAIS	51
4.1.1	<i>Paredes moldadas</i>	51
4.1.2	<i>Contenções tipo Berlim</i>	52
4.1.3	<i>Cortinas de estacas-prancha</i>	54
4.1.4	<i>Cortinas de estacas de betão</i>	55
4.1.5	<i>Vantagens e limitações das soluções de contenção de escavações mais comuns</i>	56
4.2	CONTENÇÕES UTILIZANDO A TÉCNICA <i>DEEP SOIL MIXING</i>	57
4.2.1	<i>A escolha do método DSM para contenção de escavações</i>	57
4.2.2	<i>Vantagens e limitações de DSM como solução de contenção de escavações (SMW)</i>	58
4.2.3	<i>Painéis de Cutter Soil Mixing</i>	59
4.2.4	<i>Contenção de colunas de Deep Soil Mixing</i>	61
4.2.5	<i>Contenção tipo VERT Wall</i>	66
<b>5</b>	<b>ASPETOS DO DIMENSIONAMENTO DE CONTENÇÕES</b>	<b>69</b>
5.1	INTRODUÇÃO	69
5.2	PRINCÍPIOS GERAIS DO DIMENSIONAMENTO DE UMA CORTINA	69
5.3	GEOMETRIAS DA CONTENÇÃO	72
5.4	ESTADOS LIMITES	76

5.5	DIMENSIONAMENTO	78
5.5.1	<i>Métodos de dimensionamento</i>	78
5.5.2	<i>Verificação dos cenários do dimensionamento</i>	78
5.6	CONTROLO DE QUALIDADE	81
5.7	OBSERVAÇÃO	84
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>85</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>87</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1 - Classificação geral do <i>Soil Mixing</i> com base em: (a) estado do ligante; (b) princípio de mistura; (c) secção do eixo para administração do ligante ao solo	7
Figura 2.2 - Exemplos de aplicações da técnica DSM	9
Figura 2.3 - Exemplos de padrões de DSM	10
Figura 2.4 - Avaliação do rácio da área melhorada	10
Figura 2.5 - Esquema de aplicações de DSM com variação do comprimento das colunas	11
Figura 2.6 - Esquemas de exemplos de aplicações de reforço de fundações	12
Figura 2.7 - Esquemas de exemplos de aplicações de cortinas de impermeabilização	13
Figura 2.8 - Esquemas de exemplos de aplicações de sistemas de contenção	14
Figura 2.9 - Esquema de exemplos de aplicações de DSM para mitigação da liquefação	14
Figura 2.10 - Esquema de exemplo de aplicações de DSM: sistema de confinamento de uma contaminação	15
Figura 2.11 - Aplicabilidade das várias técnicas de melhoramento de terrenos	16
Figura 2.12 - Classificação geral dos equipamentos usados nos métodos <i>Deep Soil Mixing</i>	17
Figura 2.13 - Princípios do procedimento do DSM	18
Figura 2.14 – Fluxograma da execução do método seco	19
Figura 2.15 – Procedimento de instalação de colunas	19
Figura 2.16 - Equipamento para DSM utilizando a técnica a seco, <i>Dry Mixing</i>	20
Figura 2.17 - Equipamento de mistura para método seco: técnica Nórdica	21
Figura 2.18 – Equipamento de mistura para o método seco: técnica Japonesa	22
Figura 2.19 - Fluxograma da execução da técnica por via húmida	23
Figura 2.20 – Eixos simples	24
Figura 2.21 – Eixos múltiplos	25
Figura 2.22 - Esquema exemplificativo de um equipamento de DSM para obras terrestres	26
Figura 2.23 - Esquema exemplificativo de aletas de DSM para obras terrestres	26
Figura 2.24 - Esquema de embarcação Japonesa para execução de DSM para obras no mar	26
Figura 2.25 - Aderência de material à ferramenta de DSM - Efeito saca-rolhas	29
Figura 3.1 - Ábaco triangular para a seleção do ligante	33
Figura 3.2 – Variação do teor em água de três argilas finlandesas misturadas com várias quantidades de cimento imediatamente após a mistura, com 7 dias de cura e com 28 dias de cura	39
Figura 3.3 - Variação do peso volúmico das três argilas finlandesas misturadas com várias quantidades de cimento aos 7 e 28 dias de cura	39
Figura 3.4 - Efeito do teor em cimento e tempo de cura no pH de um solo de Al-Marj, Jordânia	40
Figura 3.5 – Efeito do teor em cimento nos limites de liquidez e plasticidade de um solo de Al-Marj, Jordânia	41
Figura 3.6 - Resistência não drenada de uma argila de St-Alban misturada com 10% de vários compostos orgânicos e com 10% de cimento Portland	42

Figura 3.7 - Efeito da % de cimento no comportamento tensão-deformação de um solo de Aberdeen	43
Figura 3.8 – Alteração das curvas de tensão-deformação do ensaio de resistência à compressão uniaxial num solo-cimento por variação do tempo de cura	43
Figura 3.9 – Resistência à tração de uma argila de Singapura em função do teor em cimento	44
Figura 3.10 - Efeito da % de cimento e do tempo de cura na resistência à flexão	45
Figura 3.11 – Efeito do teor em cimento e do tempo de cura no módulo de flexão	45
Figura 3.12 – Resultado do ensaio triaxial CU para um solo de Everett, EUA tratado com 5% de cimento	46
Figura 3.13 – Variação da tensão deviatória máxima para um solo de Everett, EUA com diferentes teores de cimento	47
Figura 3.14 – Efeito do teor em cimento e tempo de cura na permeabilidade de uma argila de Singapura	48
Figura 3.15 - Efeito do teor em cimento e tempo de cura no índice de vazios de uma argila de Singapura	49
Figura 3.16 – Efeito do teor em cimento na perda de peso cumulativo por ciclos de molhagem-secagem	50
Figura 4.1 – Algumas fases do processo construtivo de uma parede moldada	52
Figura 4.2 – Esquema do processo construtivo geral de paredes moldadas	52
Figura 4.3 – Esquema de uma contenção Berlim provisória	53
Figura 4.4 – Execução de contenções Berlim provisórias	53
Figura 4.5 – Esquema de perfis de estacas-prancha	54
Figura 4.6 – Exemplos de aplicações de estacas-prancha	54
Figura 4.7 – Métodos de construção de cortinas de estacas-prancha	55
Figura 4.8 – Exemplos de cortinas de estacas de betão	56
Figura 4.9 – Fluxograma da operação de construção	58
Figura 4.10 – Diferença entre os painéis de solo-cimento construídos com DSM e com CSM	59
Figura 4.11 – Equipamento da técnica CSM	60
Figura 4.12 – Procedimento executivo de um painel de solo-cimento usando a tecnologia CSM	60
Figura 4.13 – Painel final realizado com a tecnologia CSM	61
Figura 4.14 – Sequência de execução de painéis	61
Figura 4.15 – Principais passos para a construção de uma cortina com a técnica <i>Soil Mixing</i>	62
Figura 4.16 – Sequência de instalação das colunas para formar uma SMW	63
Figura 4.17 – Padrão típico das colunas de DSM para formar uma SMW	63
Figura 4.18 – Exemplo de equipamento DSM com três veios	64
Figura 4.19 – Pormenor dos veios da ferramenta DSM	64
Figura 4.20 – Pormenor da secção 3 dos veios de rotação	65
Figura 4.21 – Resultado final de uma parede de DSM	65
Figura 4.22 – Esquema da instalação do equipamento DSM	66
Figura 4.23 – Conceito de VERT Wall – plataforma de alívio não representada	67

Figura 4.24 – Planta da VERT Wall _____	68
Figura 4.25 – Vista da frente da VERT Wall _____	68
Figura 4.26 – Resultado final da VERT Wall ) _____	68
Figura 5.1 – Esquema representativo de uma secção repetível _____	70
Figura 5.2 - Diretrizes gerais para o dimensionamento de uma SMW _____	71
Figura 5.3 – Processo de dimensionamento iterativo, incluindo ensaios laboratoriais, dimensionamento funcional, ensaios <i>in situ</i> e dimensionamento do processo _____	72
Figura 5.4 – Geometria mais usual de uma cortina de solo-cimento _____	73
Figura 5.5 – Alinhamento de colunas tangentes _____	73
Figura 5.6 – Alinhamento de colunas afastadas (neste caso com um painel de betão para ligação) _____	73
Figura 5.7 – Contenção de colunas com padrão em quincôncio _____	73
Figura 5.8 – Geometria de uma VERT WALL _____	74
Figura 5.9 – Muro de gravidade para contenção de uma escavação em Oakland, Califórnia _____	74
Figura 5.10 – Muro de gravidade para contenção de uma escavação nas Ilhas Virgem _____	75
Figura 5.11 – Alguns exemplos de geometrias de painéis CSM _____	75
Figura 5.12 – Exemplos de estados limites últimos por perda de estabilidade global _____	76
Figura 5.13 – Exemplos de estados limites últimos por rotação da cortina _____	76
Figura 5.14 – Exemplo de estado limite último de uma cortina por perda de equilíbrio vertical _____	77
Figura 5.15 – Exemplos de estados limites últimos devidos a rotura estrutural _____	77
Figura 5.16 – Exemplos de estados limites últimos devidos à rotura por arranque das ancoragens _____	77
Figura 5.17 – Mecanismo de análise de tensões _____	79
Figura 5.18 – Fluxograma do controlo de qualidade _____	82

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Siglas associadas à técnica <i>soil mixing</i>	6
Tabela 2.2 - Características de configurações de colunas	11
Tabela 2.3 - Comparação do equipamento do método seco na técnica Nórdica e Japonesa	22
Tabela 2.4 - Valores típicos da execução do método seco na técnica Nórdica e Japonesa	22
Tabela 2.5 - Comparação do equipamento para o método húmido nas técnicas Europeia e Japonesa	27
Tabela 2.6 - Valores típicos da execução para o método húmido nas técnicas Europeia e Japonesa	27
Tabela 2.7 - Principais vantagens e limitações da técnica DSM	28
Tabela 2.8 - Exemplo de aplicação: Construção de um aterro para uma via de um metropolitano no Japão	29
Tabela 2.9 - Exemplo de aplicação: Controlo e contenção de uma escavação utilizando uma VERT Wall no Texas	30
Tabela 2.10 - Exemplo de aplicação: Reforço de fundação de muros de suporte de aterro, Autoestrada do Marão	30
Tabela 3.1 - Classificação da técnica <i>Deep Soil Mixing</i> segundo o ligante utilizado	32
Tabela 3.2 - Guia complementar do ábaco da figura 3.1 (*= $IP \leq 20 + 1/4 \times (\% \text{ passa no } \#200)$ );	34
Tabela 3.3 – Características de três argilas da Finlândia estudadas por Hassan (2009)	38
Tabela 3.4 - Relação dos resultados dos ensaios de molhagem-secagem com as resistências	50
Tabela 4.1 - Vantagens e limitações dos sistemas de contenções mais comuns	56
Tabela 4.2 – Principais vantagens e limitações das SMW	59
Tabela 5.1 – Principais ensaios laboratoriais para a verificação da qualidade	83
Tabela 5.2 – Principais ensaios <i>in situ</i> para verificação da qualidade das colunas	83
Tabela 5.3 – Exemplo de instrumentos para a observação da obra	84



## **Lista de siglas, acrónimos e abreviaturas**

A/C – Relação água/cimento  
ASCE – American Society of Civil Engineers  
CDM – Cement Deep Mixing  
CSM – Cutter Soil Mixing  
CU – Consolidado não drenado  
DJM – Dry Jet Mixing  
DLM – Deep Lime Mixing  
DMM – Deep Mixing Method  
DMW – Deep Mixing Wall  
DSM – Deep Soil Mixing  
EDTA – Ácido Etilenodiamina Tetra-Acético  
ELU – Estados Limites Últimos  
ELU<sub>t</sub> – Estados Limites Utilização  
EN – European Norm  
FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia  
ID – Índice de Durabilidade  
ISSMGE – International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
NGES – National Geotechnical Experimentation Site  
RCU – Resistência à Compressão Uniaxial  
SGI – Swedish Geotechnical Institute  
SM – Soil Mixing  
SMM – Shallow Mixing Method  
SMW – Soil Mixed Wall  
SSM – Shallow Soil Mixing  
UNL – Universidade Nova de Lisboa  
VERT – Vertically Earth Reinforced Technology

## Lista de símbolos

### Letras latinas

A – Área total  
 $A_c$  – Área de *Soil Mixing*  
 $A_m$  – Área de melhoramento  
b – Largura média  
d – Altura média  
E – Módulo de deformabilidade  
 $E_f$  – Módulo de flexão  
I – Momento de inércia  
ID – Índice de durabilidade  
IP – Índice de plasticidade  
L – Comprimento do provete  
mo – Matéria orgânica  
P – Carga total aplicada  
 $R_c$  – Resistência com ciclos  
 $R_f$  – Resistência à flexão  
 $R_s$  – Resistência sem ciclos  
w – Teor em água  
 $w_L$  – Limite de liquidez  
 $w_{nat}$  – Teor em água natural  
 $w_p$  – Limite de plasticidade

### Letras gregas

$\Delta$  – Deflexão no meio do provete  
 $\gamma$  – Peso volúmico  
 $\gamma_d$  – Peso volúmico aparente seco

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento do tema

Desde a antiguidade que o Homem tenta dominar e modificar a Natureza para satisfazer necessidades. Quando um solo não apresenta as características de resistência, deformabilidade ou permeabilidade adequadas à construção projetada, há que o melhorar, através da modificação da matriz do solo, ou reforçar, introduzindo elementos resistentes para onde vão ser transferidas as cargas que o solo não tem capacidade para resistir. Muitas das técnicas de melhoramento são já seculares, sofrendo evolução ao longo do tempo devido ao desenvolvimento de ferramentas, aparecimento de novos materiais e aumento de exigências relativas ao comportamento do solo.

O melhoramento de terrenos está a tornar-se cada vez mais comum para resolver uma série de problemas, tanto temporários como permanentes, na área de Engenharia Civil. Hoje em dia, existe a necessidade de se ocupar em terrenos com fracas características geotécnicas, devido a situações como a escassez de locais geotecnicamente adequados e a necessidade ecológica de poupar locais “virgens”, privilegiando a construção em zonas de aterro ou zonas industriais.

Tem então havido um crescente desenvolvimento da construção em solos geotecnicamente pobres, que representam para o engenheiro geotécnico o desafio de proporcionar um desempenho satisfatório a baixo custo. A importância do melhoramento de terrenos na construção civil é fundamental, pois permite instalar infraestruturas em locais estrategicamente relevantes, mesmo que o solo em questão possua fracas características mecânicas.

Podem considerar-se, dentro das soluções de Melhoramento de Terrenos, um conjunto de técnicas de grande interesse que permitem implantar uma infraestrutura num dado local, com adequadas condições de segurança, através da modificação controlada do estado, natureza ou comportamento dos terrenos, com o objetivo de obter resposta satisfatória a uma ação de Engenharia Civil (Mitchell e Jardine, 2002). Estes tipos de soluções têm um vasto domínio de aplicação, apresentando, por vezes, boas relações custo/benefício. A definição da técnica mais adequada para um dado fim depende não só das condições do terreno (características geotécnicas locais e envolvente), como também da dimensão da área a tratar, sua localização e solicitações a transmitir ao terreno, não esquecendo a competitividade económica e a compatibilidade com outros trabalhos construtivos que se realizem na obra. Consegue-se então, por exemplo: reduzir assentamentos, aumentar a resistência, controlar a permeabilidade, melhorar a estabilidade geral, mitigar o potencial de liquefação de solos, conter solos instáveis e melhorar a trabalhabilidade.

Podem ser encontradas na bibliografia várias classificações para as técnicas de Melhoramento de Terrenos (Van Impe, 1989, e Chu et al, 2009). Das classificações mais recentes destaca-se a de Chu

et al (2009), apresentada na 17ª conferência internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE). O documento apresentado incidiu sobre os processos construtivos das várias técnicas de melhoramento de terrenos, e classifica-as 5 tipos:

- A. melhoramento de terrenos sem aditivos em solos incoerentes e materiais de enchimento;
- B. melhoramento de terrenos sem aditivos em solos coesivos;
- C. melhoramento de terrenos com aditivos ou inclusões de outros materiais;
- D. melhoramento de terrenos com aditivos do tipo calda;
- E. reforço de terrenos.

Como exemplo de cada grupo, respetivamente, tem-se: vibrocompactação, electrosmose, vibrosubstituição, *Deep Soil Mixing* e pregagens. Assim, a técnica abordada nesta dissertação – *Deep Soil Mixing* (DSM) – pertence ao grupo C da classificação anterior se os aditivos forem introduzidos no terreno em forma seca. Por outro lado, se os aditivos forem introduzidos em forma de calda, a técnica enquadra-se no grupo D.

A utilização de solos como materiais de construção através da sua mistura *in situ* com ligantes tem vindo a ser alvo de intensificação e diversificação ao longo do tempo, tendo-se desenvolvido técnicas a fim de encontrar soluções cada vez mais sustentáveis, que permitam obter resultados satisfatórios.

A utilização de técnicas de melhoramento de solos em profundidade, com recurso a misturas do tipo solo-ligante, tem vindo a crescer nas últimas décadas no mercado nacional em termos de aplicações, nomeadamente como elementos de fundação e de contenção de terrenos, em particular quando o ligante é constituído pelo cimento. Entre estas técnicas destacam-se a tecnologia de *Jet Grouting* (mistura através de sistema hidráulico) e do *Deep Soil Mixing* (mistura através de sistema mecânico). A utilização destas técnicas, que permitem a incorporação do solo pré-existente na solução final, tem permitido uma resposta positiva às necessidades da indústria na procura sucessiva de soluções alternativas às mais convencionais, com vantagens técnicas, económicas e ambientais (Pinto, 2010).

*Soil Mixing* (SM) é um termo genérico para todos os métodos de melhoramento de terrenos em que os ligantes, geralmente a cal ou o cimento, são mecanicamente misturados com o solo e esta nova mistura apresenta melhores características de resistência, permeabilidade e compressibilidade que o solo base (Larsson, 2003). A técnica SM pode ser subdividida em dois métodos gerais: o *Deep Mixing Method* ou *Deep Soil Mixing* (DMM ou DSM), ou método de mistura profunda, e o *Shallow Mixing Method* (SMM), ou método de mistura superficial.

No DSM, a mistura é feita através da rotação de eixos com pás ou hélices, no caso da construção de colunas, ou com rodas dentadas, semelhante a uma fresa, no caso da construção de painéis. É uma técnica com um largo domínio de aplicação, que vai desde o melhoramento de solos de fundação de

edifícios e contenção de escavações até à mitigação da liquefação e controlo de solos contaminados. Na presente dissertação irá ser abordada, fundamentalmente, a aplicação desta técnica como solução de contenção de escavações.

De um modo geral, pode-se considerar o DSM um método bastante versátil, pois admite-se a sua aplicação numa vasta gama de solos desde areias a argilas, sendo igualmente viável o tratamento de solos orgânicos, lamas e turfas. A mistura de solos em profundidade com cal e cimento é usada na Suécia desde meados dos anos 70 do século passado como técnica de melhoramento e no Japão há já mais de 40 anos.

Neste trabalho, o termo *Soil Mixing* será adotado como um termo genérico para representar métodos de mistura de solos através de sistema mecânico, sem diferenciar origens, equipamentos específicos, procedimentos e áreas de aplicação. A variabilidade de metodologias *Soil Mixing* está assente em vários parâmetros, como no tipo de ferramenta de mistura, tipo de energia de mistura aplicada (hidráulica ou mecânica ou a combinação das duas) e a adição de ligantes na forma seca ou húmida.

## 1.2 Objetivo

A presente dissertação, inserida no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), tem por objetivo apresentar uma contribuição para o estudo da técnica de melhoramento de terrenos através da mistura de solos em profundidade – *Deep Soil Mixing* (DSM) – como aplicação a contenções de escavações. Neste trabalho será feita uma análise dos aspetos técnicos do DSM, nomeadamente as suas aplicações, aplicabilidade e procedimentos construtivos; a compreensão das características geotécnicas da mistura solo-ligante e a abordagem geral aos métodos de dimensionamento de cortinas de contenção de escavações construídas com a técnica DSM.

## 1.3 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, da seguinte forma:

- ▶ neste Capítulo 1 faz-se uma breve introdução e enquadramento do tema, definindo-se objetivos;
- ▶ o Capítulo 2 apresenta uma síntese técnica do tema, onde se abordam vários aspetos relacionados com o *Deep Soil Mixing*, como por exemplo a sua aplicação, as várias metodologias e classificações existentes e algumas vantagens e limitações;
- ▶ o Capítulo 3 diz respeito às características da mistura solo-ligante, apresentando-se de uma maneira generalizada os ligantes mais utilizados nesta técnica, dando-se relevância ao cimento; analisam-se então as principais propriedades geotécnicas obtidas de misturas solo-cimento;

- ▶ no Capítulo 4 enquadra-se a técnica *Deep Soil Mixing* nas soluções de contenção de escavações; apresentam-se as soluções mais convencionais, seguindo-se a abordagem aos processos construtivos e equipamento das técnicas DSM aplicadas à contenção de escavações, referenciando as suas vantagens e limitações para esta aplicação;
- ▶ no Capítulo 5 faz-se uma breve referência aos processos gerais de dimensionamento de uma cortina de contenção de escavação com colunas DSM e ao controlo de qualidade e observação;
- ▶ o Capítulo 6 inclui as considerações finais desta dissertação e algumas sugestões para futuras investigações dentro deste tema.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a realização da dissertação.

## 2 As técnicas de *Soil Mixing*

### 2.1 Perspetiva global e conceitos

Nomes como *Soil Mixing* (SM), *Deep Soil Mixing* (DSM), *Cement Deep Mixing* (CDM), *Soil Mixed Wall* (SMW), *Jet Grouting*, *Dry Jet Mixing* (DJM) e Colunas de Cal ou Cimento, estão associados a métodos/técnicas com a mesma base objetiva: encontrar a forma mais eficiente e económica de misturar um ligante com o solo, conseguindo modificar as suas propriedades consoante as exigências projetadas (Townsend e Anderson, 2004). A mistura de solos em geral (*Soil Mixing*) pode ser dividida em dois métodos consoante a profundidade a que é aplicada:

- Método de mistura à superfície (SMM – *Shallow Mixing Method*);
- Métodos de mistura em profundidade (DMM – *Deep Mixing Method* ou DSM – *Deep Soil Mixing*) – com profundidades de tratamento que podem variar, segundo a norma EN 14679 (2005) entre 3 e 50 metros.

Contudo, apesar de a sua divisão se sustentar no referido critério, deve realçar-se que o tratamento de solos à superfície pode igualmente ser executado com o recurso ao método DMM ou DSM. Esta versatilidade tem como consequência a utilização do método com maior regularidade em casos de obra (Bruce, 2000).

*Deep Soil Mixing* é uma tecnologia de melhoramento de solos através da qual o solo é misturado com ligantes, como por exemplo a cal, o cimento, cinzas volantes, etc., e que podem ser introduzidos no terreno em forma seca (*dry mixing*) ou em forma de caldas (*wet mixing*), através de um eixo rotativo oco que na sua ponta está equipado com uma ferramenta de corte, de forma a construírem-se colunas ou painéis de um novo material a que se pode chamar solo-ligante (Bruce, 2000).

A aplicação da técnica estende-se a diversos domínios da Geotecnia, como por exemplo, o reforço de fundações, a estabilidade de taludes, a mitigação de liquefação, o controlo e contenção de escavações com elementos de solo-ligante. Esta última será a aplicação da técnica abordada nesta dissertação. O leque de solos atreitos ao DSM é vasto, pois vai desde os solos mais moles aos solos granulares, sendo que para solos siltsos e argilosos a solução construtiva mais adequada é diferente da adequada para solos granulares como se verá adiante.

O solo vai responder a esta técnica com a melhoria de características hidromecânicas como a resistência, a compressibilidade e a permeabilidade, que vão sempre depender do tipo de solo em questão, do método de mistura e das características do ligante que está a ser utilizado na mistura. Pode dizer-se que no início se tem um solo e no fim se obtém um material com características semelhantes a uma rocha branda (Moseley e Kirsch, 2004).

A execução desta técnica divide-se em duas fases fundamentais. A primeira fase consiste na perfuração do solo e sua desagregação mecânica com recurso a diversos tipos de ferramentas de corte constituídas por trados e aletas ou pás misturadoras que rodam em torno de um eixo vertical. Na segunda fase extrai-se o equipamento com rotação e introdução simultânea do ligante seco ou em calda a baixa pressão, provocando assim a dispersão do mesmo, construindo então as colunas do novo material solo-ligante. Estas colunas podem ainda ser reforçadas com perfis metálicos, com o objetivo de obter uma estrutura ainda mais rígida e resistente. Se houver necessidade, podem introduzir-se durante a fase de perfuração agregados, como por exemplo areias, para ajudar à eficiência do processo (Sousa, 2009). O processo executivo será abordado mais aprofundadamente no capítulo 2.5.

À tecnologia do *Deep Mixing* estão associadas uma série de siglas e terminologias. Na tabela 2.1, estão definidos alguns termos utilizados na indústria da mistura de solos e seu estudo (Rutherford, 2004).

**Tabela 2.1 – Siglas associadas à técnica *soil mixing* (adaptado de Rutherford, 2004)**

Sigla	Terminologia
<b>SM</b>	Soil Mixing
<b>SSM</b>	Shallow Soil Mixing
<b>DSM</b>	Deep Soil Mixing
<b>CDM</b>	Cement Deep Mixing
<b>DMM</b>	Deep Mixing Method
<b>DJM</b>	Dry Jet Mixing
<b>DLM</b>	Deep Lime Mixing
<b>CSM</b>	Cutter Soil Mixing
<b>DMW</b>	Deep Mixing Wall
<b>SMW</b>	Soil Mixed Wall

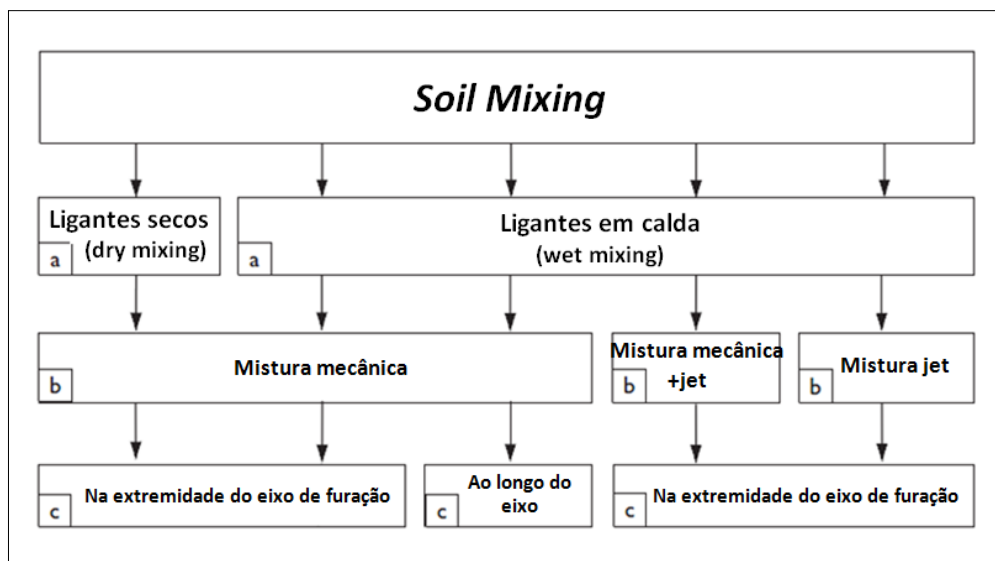
Das várias classificações que existem da técnica *Soil Mixing*, a que se apresenta na figura 2.1 tem em conta o estado em como o ligante é administrado ao solo, local no eixo de rotação por onde se faz essa administração e o princípio de mistura.

## **2.2 Breve histórico**

De acordo com Bruce *et al* (1998), de entre os vários tipos de técnicas de *Soil Mixing*, o conceito original vem dos EUA, onde em 1954 uma vara única foi usada para misturar ligantes com o solo. No entanto, o *Deep Soil Mixing* na sua forma atual foi desenvolvido no Japão e na Suécia. A técnica foi apresentada à comunidade científica pela primeira vez num fórum internacional em 1975, na forma de



dois artigos: um proveniente da Suécia, por Broms e Boman, e outro do Japão, por Okumura e Terashi (Bruce *et al*, 1998).



**Figura 2.1 - Classificação geral do *Soil Mixing* com base em: (a) estado do ligante; (b) princípio de mistura; (c) secção do eixo para administração do ligante ao solo (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

Na Europa, segundo Massarsch e Topolnicki (2005), a inovação de melhorar o solo *in situ*, através da mistura deste com aditivos ou ligantes, foi feita na Polónia em 1966. O aditivo era introduzido a partir da ponta de um misturador mecânico, constituído por uma cabeça de perfuração simples e aletas horizontais.

O desenvolvimento da técnica com construção de colunas começou em 1967 na Suécia e baseou-se em misturas de solo *in situ* com cal viva. Os agentes ligantes foram estudados no laboratório do Swedish Geotechnical Institute (SGI) e após o desenvolvimento de um procedimento adequado, foram instaladas, experimentalmente, algumas colunas em campo. O primeiro equipamento consistiu em algo semelhante a uma grande broca montada num trator Volvo. Concomitantemente com o que se passava na Suécia, o desenvolvimento da investigação da técnica de *Deep Mixing* esteve em andamento no Japão desde 1967, onde se realizaram ensaios de laboratório e modelos. Os Japoneses desenvolveram o método húmido de mistura (*wet method*), em que o ligante, neste caso cimento, era pré-misturado com água e introduzido no solo como uma pasta ou calda (Moseley e Kirsch, 2004).

Na Europa Central, as primeiras atividades do método húmido tiveram lugar na Alemanha, França e Itália no final dos anos 70, início dos anos 80 do século passado (Bruce *et al*, 1998).

A aplicação da técnica em escavações, com base no conceito da mistura de solos *in situ* em colunas iniciado nos anos 50 nos Estados Unidos, foi experimentada pelos construtores japoneses já no final dos anos 60, início dos anos 70 do século passado. Nessa altura foram instaladas colunas de *Soil*

*Mixing* ao longo de uma linha para criar um painel com o objetivo de suporte de escavações e controle de percolação de águas subterrâneas, nas construções de caves ou outras estruturas do subsolo, tecnicamente chamadas de cut-off walls ou cortinas de impermeabilização. Em 1976, a empresa Seiko Kogyo Co. desenvolveu e introduziu o conceito de *Soil Mixed Wall* (SMW), usando trados e pás descontínuos em intervalos discretos, geralmente ao longo de três eixos dispostos numa linha, com o objetivo de conter escavações e controlar a percolação de águas subterrâneas (Rutherford, 2004). Devido às condições hidrogeológicas existentes na grande maioria das cidades japonesas, a continuidade e uniformização dos painéis em solo-cimento tornou-se um dos grandes requisitos para o controle de águas subterrâneas, evitando o colapso de edifícios ou outras estruturas adjacentes às escavações.

O reforço das colunas com perfis metálicos antes de a mistura ganhar presa surgiu entretanto, com objetivo de se obter uma maior resistência à flexão. (Yang, 2003).

Em 1977, a empresa mundial de equipamentos de Geotecnia *Bauer* construiu painéis verticais no solo, para depois aplicar pregagens, evitando a utilização de betão projetado. Os painéis foram construídos com recurso a quatro varas em hélice, com cerca de 0.2m de diâmetro, dispostas num alinhamento. Posteriormente, um sistema mais avançado de varas triplas foi desenvolvido desde o início dos anos 90, composto por três varas pouco espaçadas num alinhamento em que duas das varas rodam em conjunto e uma roda na direção contrária. Este sistema é usado vulgarmente desde 1994 para a construção de painéis para suporte de escavações temporárias e permanentes, cortinas de impermeabilização, melhoramento do terreno e efeitos ambientais (Moseley e Kirsch, 2004).

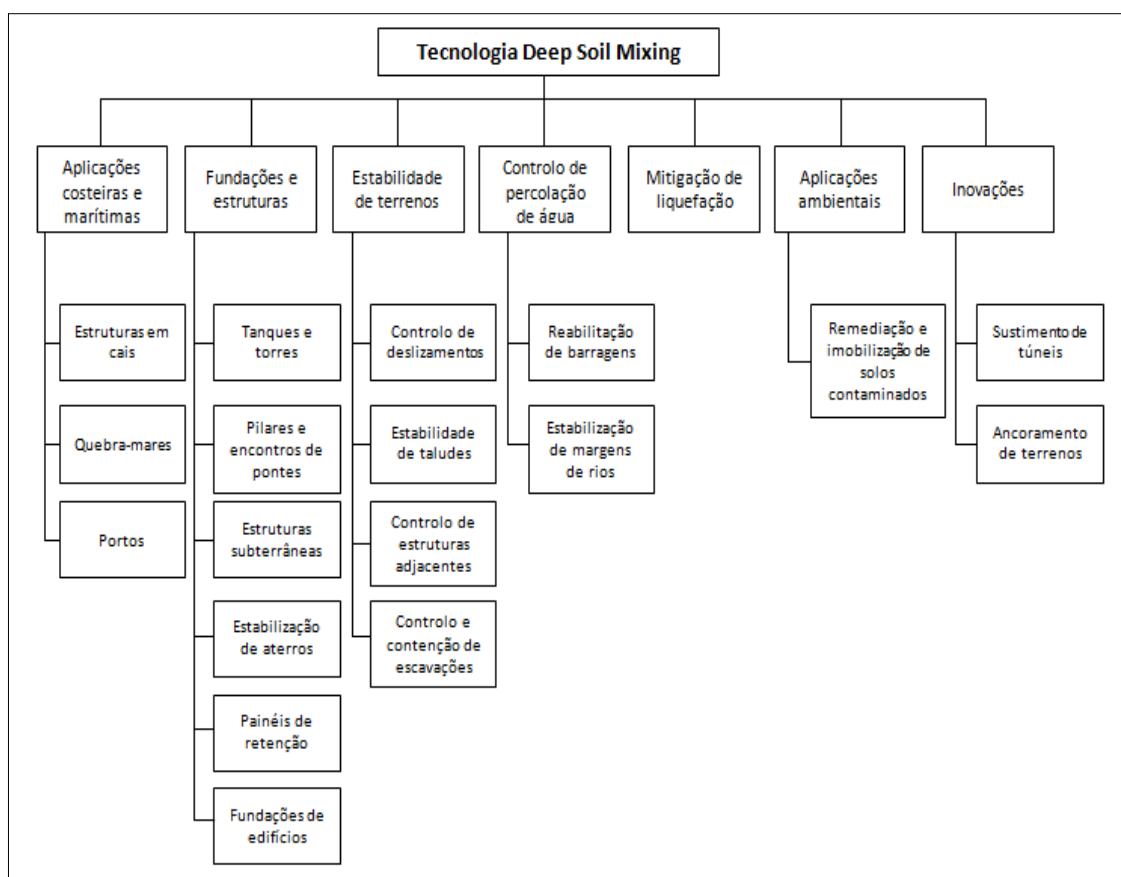
O método *Deep Soil Mixing* evoluiu rapidamente e um número relativamente grande de organizações e empresas têm desenvolvido os seus próprios processos de mistura, resultando numa enorme variedade de técnicas.

## 2.3 Domínio de aplicação

A aplicação da técnica DSM estende-se a diversos domínios da Geotecnia: reforço de fundações de estruturas e aterros, estruturas de contenção, estabilização de taludes, estabilização e contenção de escavações e mitigação da liquefação são os principais exemplos. Os objetivos da utilização desta técnica focam-se essencialmente na redução de assentamentos, aumento da capacidade resistente, aumento da estabilidade, diminuição do potencial de liquefação, entre outros (Bruce, 2000). O esquema da figura 2.2 reflete esse mesmo leque de variadíssimas aplicações da técnica.

Dependendo da finalidade, condições iniciais do solo, dimensionamento, estabilidade e custos, são usadas várias configurações ou padrões para se obterem os resultados desejados, utilizando colunas espaçadas, sobrepostas, isoladas ou em grupo. Na figura 2.3 estão esquematizadas as configurações mais comuns. Se o objetivo for a redução de assentamentos, as colunas são

normalmente dispostas num padrão triangular ou quadrado. Quando o propósito está relacionado com a garantia de estabilidade de taludes ou escavações ou preservar estruturas adjacentes, as colunas costumam ser configuradas de modo a formarem um painel perpendicular à superfície de rotura. A sobreposição de colunas é particularmente importante quando se está perante uma situação de necessidade de confinamento hidráulico ou de criação de barreiras ambientais (EN 14679, 2005).



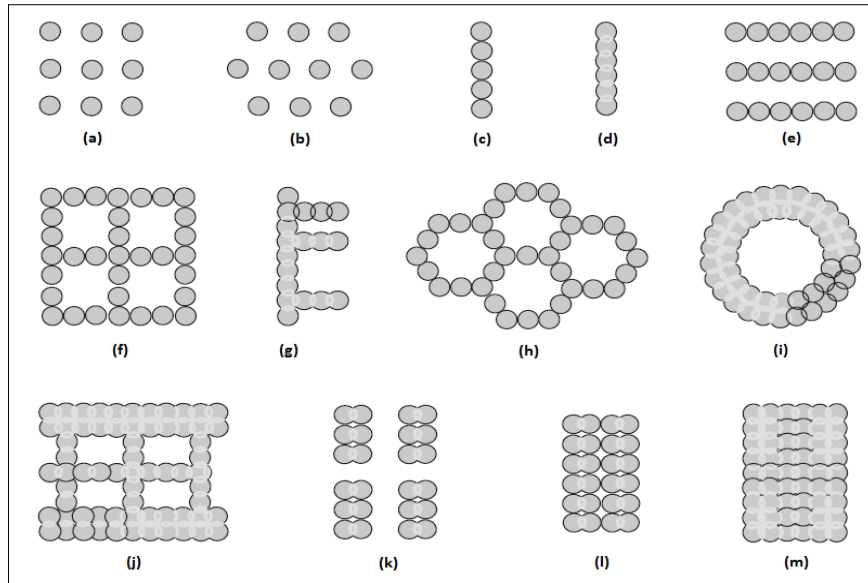
**Figura 2.2 - Exemplos de aplicações da técnica DSM (adaptado de Bruce, 2000)**

No caso dos equipamentos de DSM incluírem eixos múltiplos dispostos linearmente, os painéis são normalmente executados com uma intersecção entre os painéis primários e os painéis secundários, com sobreposição parcial ou total dos diâmetros das colunas. Com as possíveis combinações de conjuntos de colunas, também podem ser configuradas redes, células ou instalações circulares. Os blocos de colunas são usados com o objetivo de criarem grandes volumes estáveis que funcionam como estruturas de gravidade.

A fim de comparar os vários padrões em termos de área de melhoramento, e para avaliar os elementos e o solo adjacente a eles, Moseley e Kirsch (2004) propuseram uma relação para a área de melhoramento  $A_m$  definida pela equação 2.1 e figura 2.4.

A instalação de padrões de colunas pode variar não só no plano mas também na profundidade de melhoramento (figura 2.5). Os painéis podem ser instalados alternadamente curtos e compridos para

reduzir custos (figura 2.5a). Os mais profundos transferem as cargas externas e exercidas pela estrutura para os estratos de suporte e os mais curtos conectam os profundos, melhorando a rigidez da massa total de solo melhorado. Outro exemplo é a variação do tamanho de colunas gradualmente e/ou em zonas específicas (figura 2.5b-d). Pode ainda acontecer uma combinação de diferentes tecnologias de *Soil Mixing* quando se quer melhorar uma profundidade específica abaixo da cota de superfície. Esta última situação pode ser observada na figura 2.5e, que é uma combinação de *Shallow Soil Mixing* (SSM) e DSM.

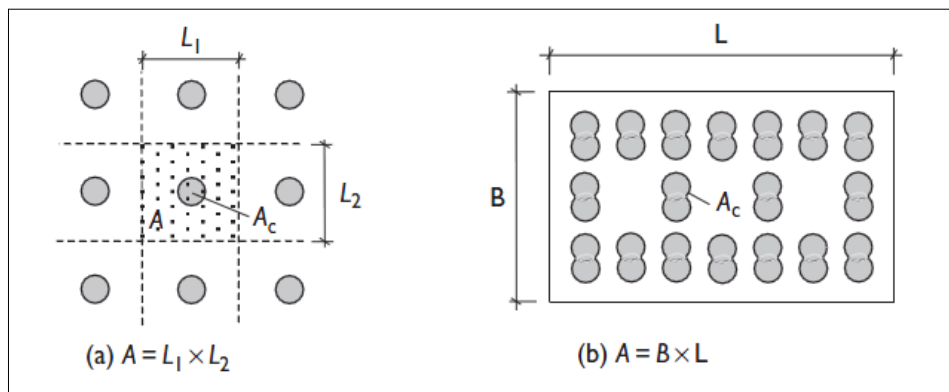


(a), (b) colunas na configuração quadrada e em quincôncio; (c) painel de colunas tangentes; (d) painel de colunas secantes; (e) conjunto de painéis; (f) rede de colunas tangentes; (g) painel com contrafortes; (h) células; (i) anel; (j) grelha; (k) colunas em grupo; (l) grupo de colunas; (m) bloco.

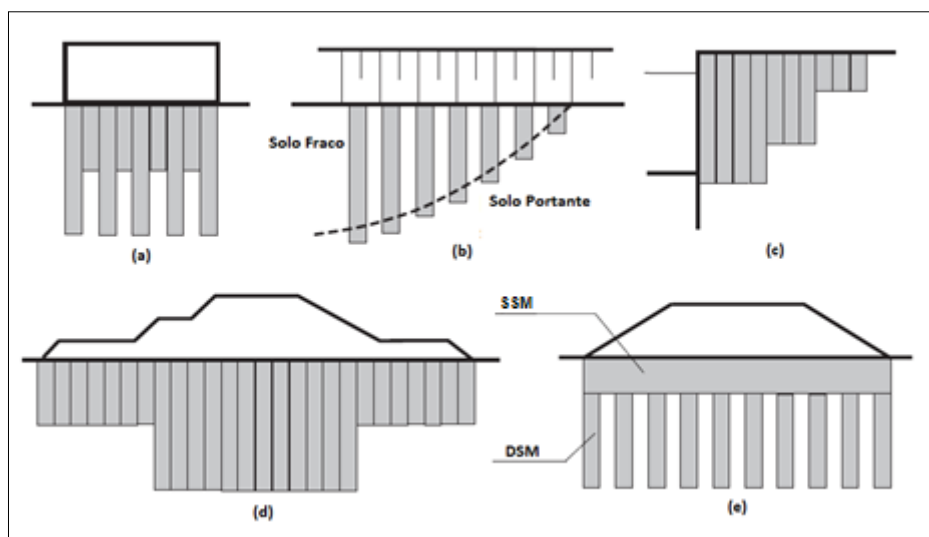
**Figura 2.3 - Exemplos de padrões de DSM (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

$$A_m = \frac{A_c}{A} = \frac{\text{Área de Soil Mixing (colunas)}}{\text{Área total}}$$

2.1



**Figura 2.4 - Avaliação do rácio da área melhorada (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**



(a) combinação de painéis curtos e longos; (b) zona de transição; (c) gradação de colunas; (d) aterro e bermas; (e) combinação de SSM e DSM

**Figura 2.5 - Esquema de aplicações de DSM com variação do comprimento das colunas (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

A tabela 2.2 compara algumas características de configurações, concluindo que o padrão tipo bloco é o que tem maior efeito na estabilidade mas também é o mais caro. A configuração em painel e grelha também ajuda à estabilidade e é mais barata.

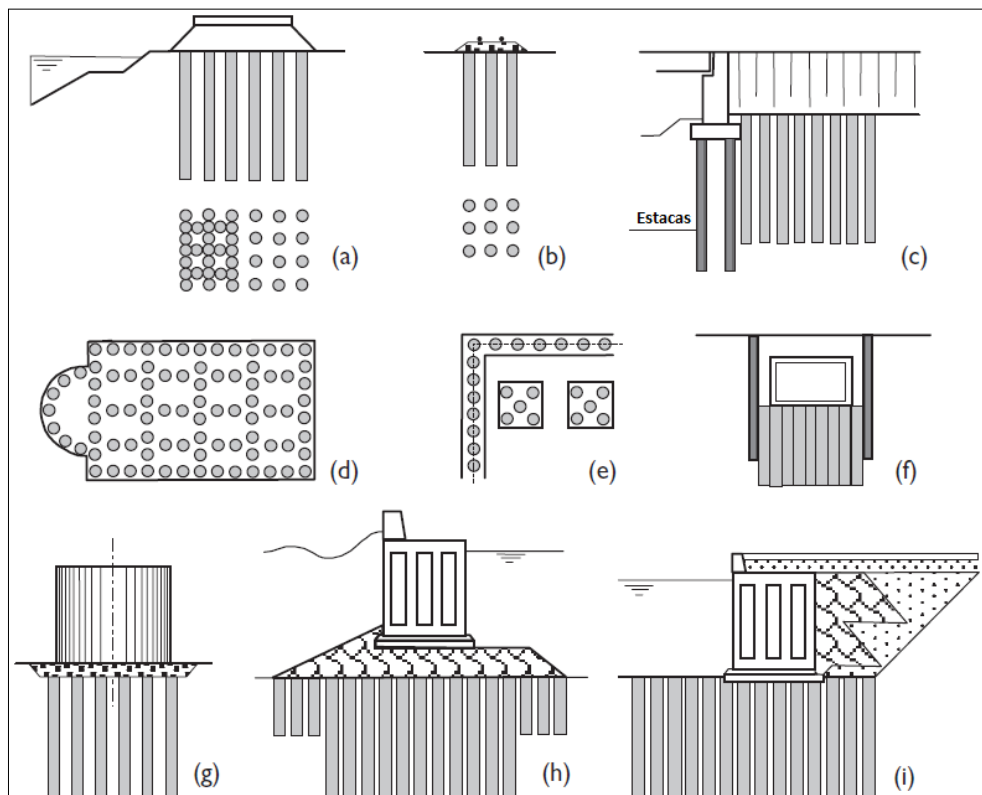
**Tabela 2.2 - Características de configurações de colunas (adaptado de Essler e Kitazume, 2009)**

	Estabilidade	Custos	Instalação	Considerações de dimensionamento
<b>Bloco</b>	Grande estabilidade. Bloco sólido resistente a forças externas.	Volume de melhoramento maior que outras configurações. Custo elevado.	Processo moroso, pois as colunas são sobrepostas.	Dimensionamento semelhante a estruturas de gravidade.
<b>Painel</b>	Obtém-se grande estabilidade quando todos os painéis estão bem interligados.	Volume de melhoramento menor que a configuração em bloco. Baixo custo.	Requer uma operação precisa aquando da sobreposição das unidades.	Requer a consideração do solo não melhorado entre os painéis. O grau de melhoramento é afetado pela estabilidade interna.
<b>Rede/Grelha</b>	Altamente estável quando associada a um bloco.	Custos entre os do painel e do bloco.	Devido à sua configuração, a sequência de instalação é complexa.	Requer um dimensionamento das forças internas a três dimensões.
<b>Grupo de Colunas</b>	Quando as tensões laterais são fracas, consegue-se uma boa estabilidade.	A instalação é rápida e o volume de melhoramento é baixo. Baixo custo.	Não existe sobreposição de colunas.	Requer dimensionamento de estabilidade global e de estabilidade interna em cada coluna.

De seguida apresentam-se cinco aplicações de DSM que merecem destaque (Moseley e Kirsch, 2004).

### 2.3.1 Reforço de fundações

O objetivo de usar esta técnica em fundações é essencialmente a redução de assentamentos e o aumento da capacidade resistente de solos de fundação fracos. Para a redução de assentamentos, os padrões de instalação de colunas empregam tipicamente colunas simples ou combinadas com espaçamento variável. Quando se está a lidar com cargas verticais importantes ou forças horizontais, usam-se combinações de colunas para formar painéis, redes e blocos (figura 2.6). O projeto de tais padrões requer uma análise rigorosa da interação entre o solo tratado e não tratado.



(a) aterro ferroviário; (b) aterro; (c) Encontros de ponte; (d) laje; (e) edifício; (f) *box-culvert* de drenagem; (g) tanque e silo; (h) quebra-mar; (i) cais

**Figura 2.6 - Esquemas de exemplos de aplicações de reforço de fundações (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

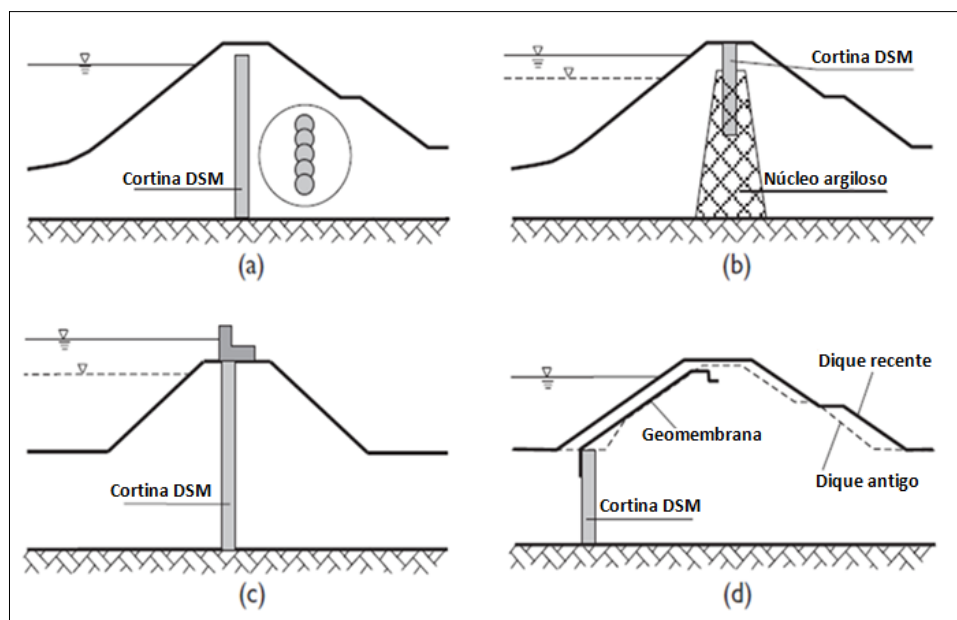
### 2.3.2 Cortinas de impermeabilização

Constroem-se instalando painéis de colunas para deter a percolação ou escoamento de água. As estruturas são instaladas em estratos permeáveis, até um nível de baixa permeabilidade, penetrando entre 0,5 a 1 m na camada de base terrosa ou terminando no topo do substrato rochoso. As principais aplicações envolvem a reabilitação ou modernização de antigas estruturas de retenção de água (barragens de aterro, diques ou margens dos rios) (figura 2.7) e, em caso de escavações, podem ser utilizadas para impedir o escoamento de água para o interior da escavação.

### 2.3.3 Sistemas de contenção

Os sistemas de contenção incluem aplicações associadas a contenções de impulsos de terras, proteção de estruturas adjacentes a escavações e prevenção de deslizamentos de terrenos e estabilidade de taludes (figura 2.8). Neste tipo de problema, fazem-se combinações de colunas de modo a formar painéis ou grelhas.

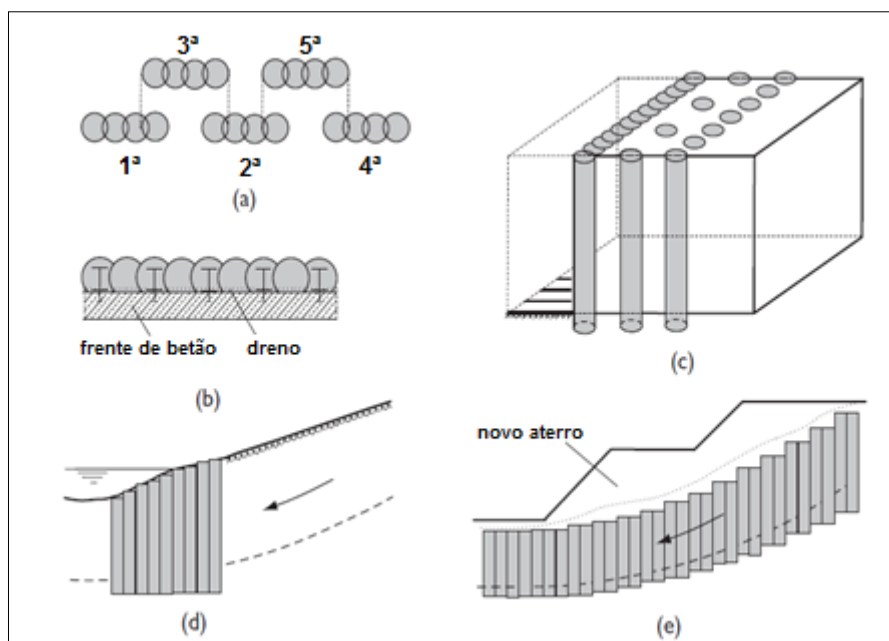
A figura 2.8c apresenta um sistema inovador de contenção de escavações que não necessita de ser ancorado ou escorado - *VERT WALL SYSTEM*. Consiste tipicamente num conjunto de alinhamentos de colunas solo-ligante construídas com a técnica *Deep Soil Mixing*, formando painéis ou fiadas de colunas isoladas. Estas últimas colunas isoladas são dimensionadas para garantir ações compostas entre os elementos constituintes do primeiro painel e fornecer-lhe estabilidade externa em conjunto com uma plataforma no coroamento das colunas (para coneta-las), construída com os refluxos, aumentando a sua resistência à flexão.



(a) impermeabilização de uma barragem; (b) extensão de um núcleo argiloso; (c) dique fluvial, com superestrutura na crista; (d) proteção de infiltrações

**Figura 2.7 - Esquemas de exemplos de aplicações de cortinas de impermeabilização (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

Existe ainda uma tecnologia recente, derivada do *Deep Soil Mixing*, o *Cutter Soil Mixing* (CSM), que é bastante apropriada para sistemas de contenção e que consiste na construção de painéis contínuos, formando um só painel. O solo é desagregado mecanicamente por rodas metálicas de corte. A grande diferença entre o DSM tradicional e o CSM está na ação mecânica das rodas do CSM que giram em torno de eixos horizontais originando painéis retangulares de solo-ligante, em vez da ferramenta de corte do DSM, que gira em torno de eixos verticais originando colunas de solo-ligante. Tanto as VERT WALLS como a tecnologia CSM serão novamente abordadas no Capítulo 4.

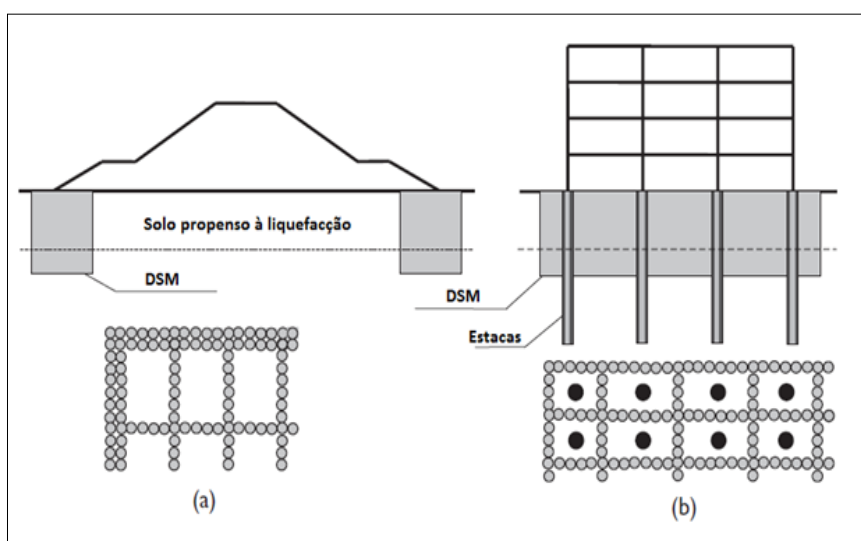


(a) painel típico de DSM; (b) painel de DSM com uma frente de betão; (c) *VERT WALL* sem a plataforma no coroamento; (d) controlo de deslizamento; (e) estabilização de talude

**Figura 2.8 - Esquemas de exemplos de aplicações de sistemas de contenção (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

### 2.3.4 Mitigação da liquefação

A mitigação do potencial de liquefação de um solo pode se efetuada com colunas de *Soil Mixing* em padrões formando painéis (isolando o solo), ou redes/grelhas ou blocos (figura 2.9), sendo que os mais eficazes são em rede. A aplicação, nestes casos, conduz à redução da tensão de corte e da pressão intersticial.



(a) proteção de uma barragem; (b) melhoria da resistência lateral de estacas

**Figura 2.9 - Esquema de exemplos de aplicações de DSM para mitigação da liquefação (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**



### 2.3.5 Remediação ambiental

Nesta aplicação está implícita a instalação de barreiras de confinamento e de solidificação/estabilização em solos contaminados e lamas para proteção ambiental. Dentro das estruturas de tratamento incluem-se barreiras passivas, instaladas para evitar a migração de lixiviados, e barreiras ativas, que têm uma permeabilidade semelhante ao solo nativo, construídas no perímetro do local contaminado. As barreiras ativas são como que “portões” da barreira passiva, com o objetivo de reduzir efeitos significativos da contaminação no sistema de águas subterrâneas (figura 2.10). De notar que a ligação solo-ligante é muito mais difícil, pois o sistema está em contacto com um contaminante.

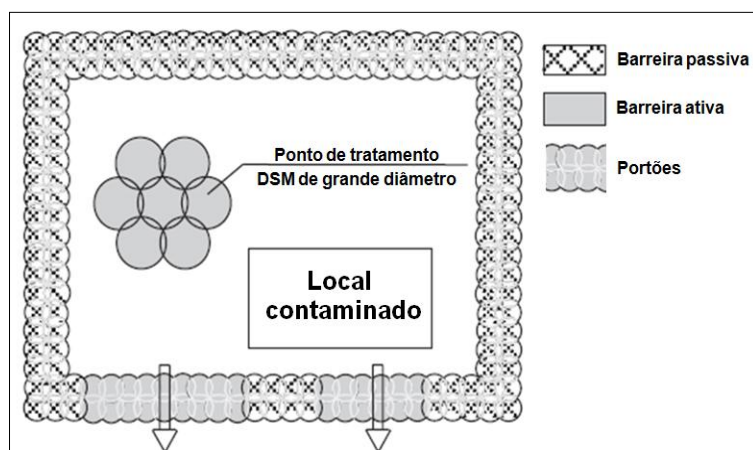


Figura 2.10 - Esquema de exemplo de aplicações de DSM: sistema de confinamento de uma contaminação (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)

## 2.4 Aplicabilidade

Como já foi dito anteriormente, a técnica DSM é bastante versátil, admitindo-se a sua aplicação a vários tipos de solos. Em geral, os solos que podem ser melhorados com sucesso com a aplicação desta técnica são: areias soltas, argilas moles e compressíveis e siltes. A técnica com ligante a seco é mais usada para melhorar as características de solos coesivos (argilas e siltes), assim como para aplicações específicas de prevenção de liquefação em solos granulares (EN 14679, 2005). Para solos granulares é habitualmente aplicada a técnica com ligantes em calda. Além dos citados, também é viável o melhoramento com DSM de solos orgânicos, lamas e turfas, sendo que o procedimento executivo nestes casos requer especial atenção. Na figura 2.11 pode-se verificar a vasta gama de solos a que esta técnica pode ser aplicada.

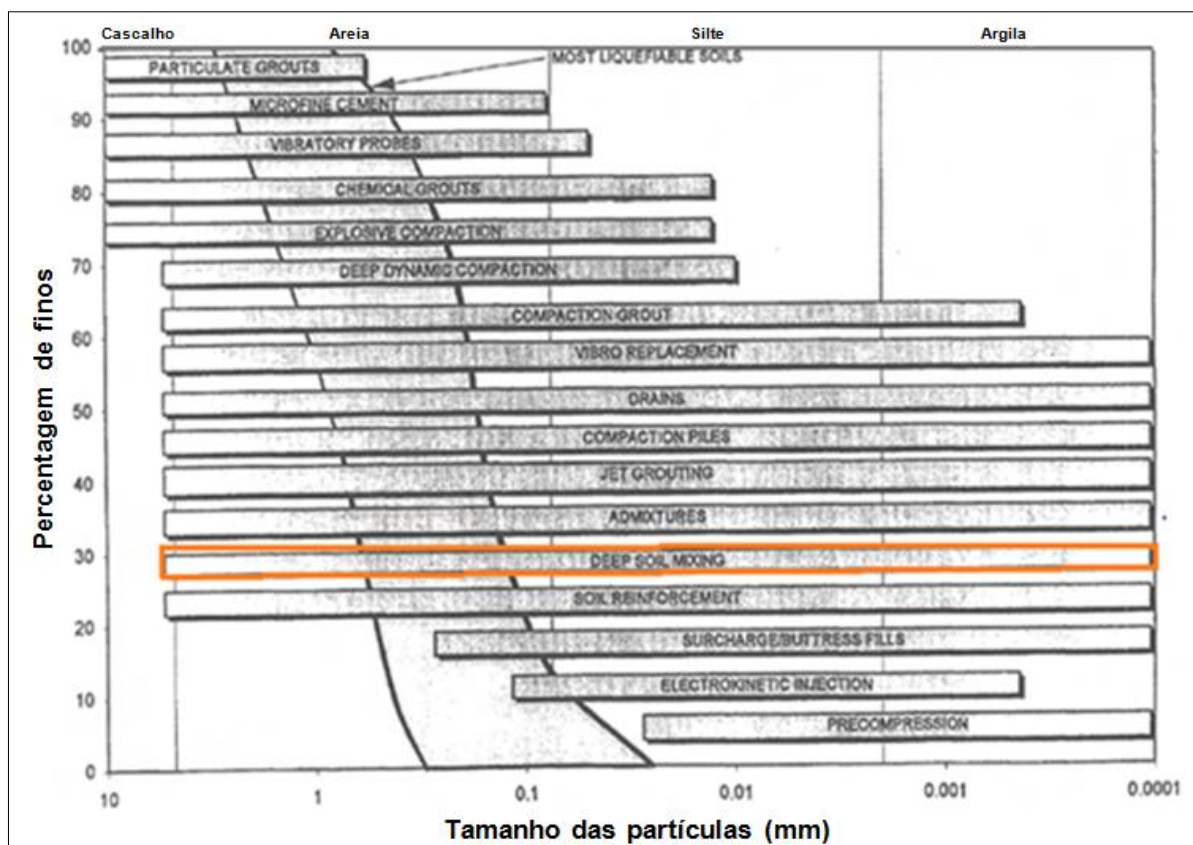


Figura 2.11 - Aplicabilidade das várias técnicas de melhoramento de terrenos (USACE, 1999)

## 2.5 Execução

### 2.5.1 Materiais

A execução da técnica DSM envolve a adição ao solo de um ou mais dos seguintes componentes (EN 14679, 2005):

- Ligante;
- água;
- agregados;
- reforço.

Os ligantes são materiais que ganham presa e endurecem, aglomerando as partículas do solo formando um novo material. Os mais usados para a execução desta técnica são a cal e o cimento, ou mistura dos dois, apesar de haver outros não tão usados como por exemplo o gesso, escórias e as cinzas. Os ligantes usados na técnica DSM irão ser abordados com maior detalhe no Capítulo 3.

A água tem o papel de se misturar com um ligante (normalmente o cimento) para formar uma calda para uso no método húmido (*wet mixing*).

Os materiais agregados têm a função de enchimento cujo objetivo é reduzir os vazios do solo. São usados em solos granulares e, em regra, é uma material com granulometria que passa no peneiro de 0,075 mm.

As colunas de *Soil Mixing* podem ainda ser reforçadas com perfis metálicos, criando uma estrutura mais rígida e resistente.

## 2.5.2 Procedimento e equipamentos

A execução tipo de elementos DSM consiste em 2 fases principais: penetração e extração. Durante a penetração, o equipamento de mistura corta e desagrega o solo até à profundidade de melhoramento desejada. Durante a extração do equipamento, o ligante é introduzido no solo a uma taxa constante, com uma velocidade de extração também constante. As pás de mistura rodam num plano horizontal e misturam o solo com o ligante. Existem variadíssimas ferramentas e equipamentos, nalguns dos quais o ligante é inserido durante a fase de penetração ou nas duas fases de penetração e extração. A classificação genérica dos equipamentos está representada na figura 2.12 e o procedimento geral de execução na figura 2.13.

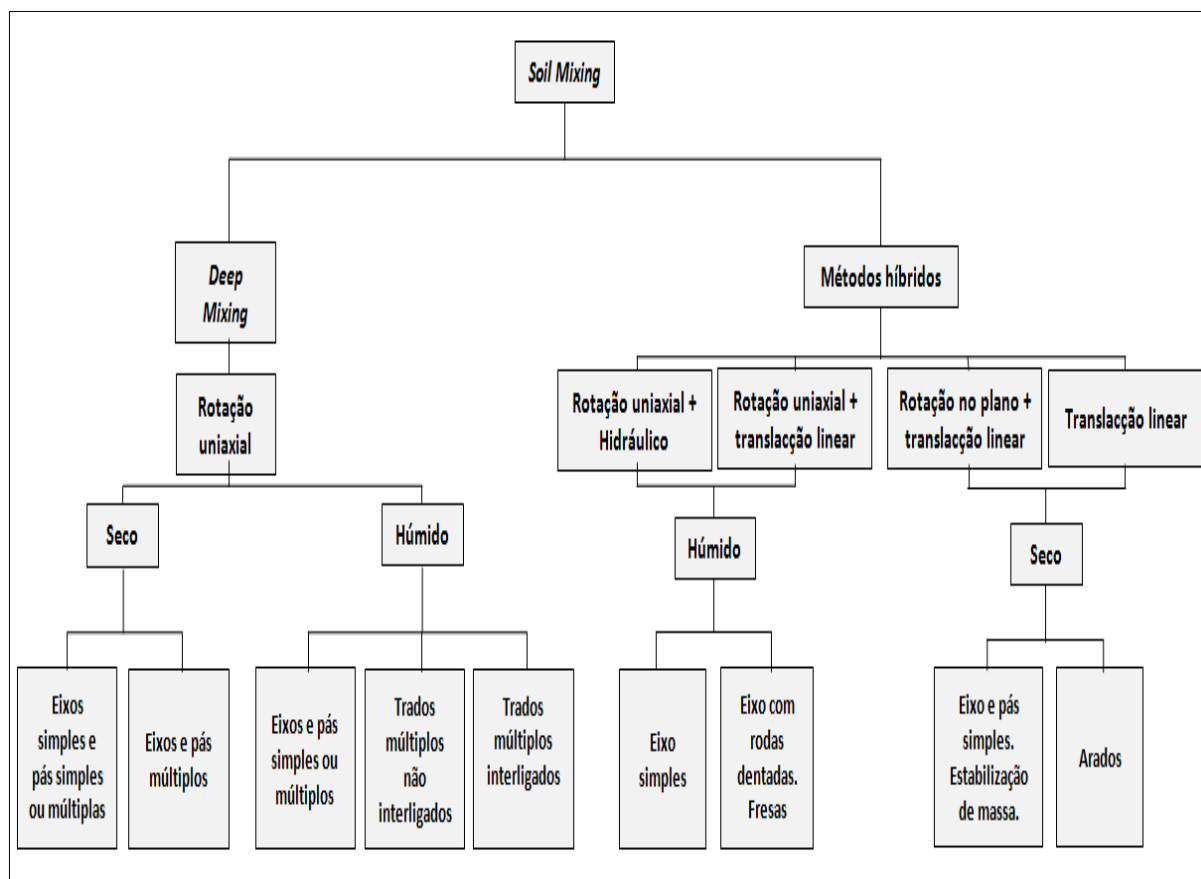


Figura 2.12 - Classificação geral dos equipamentos usados nos métodos *Deep Soil Mixing* (adaptado de EN 14679, 2005)

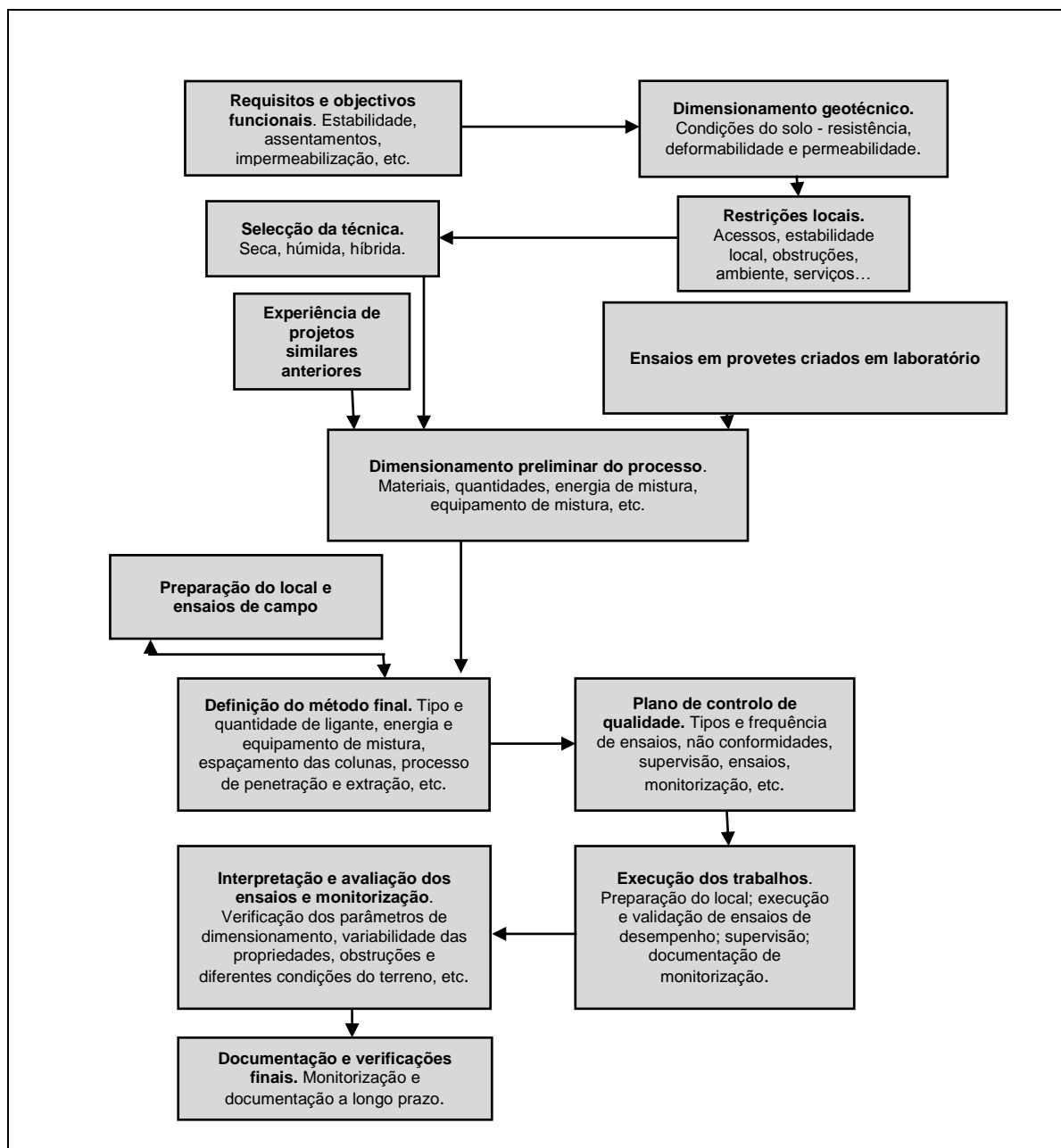


Figura 2.13 - Princípios do procedimento do DSM (adaptado de EN 14679, 2005)

### Método seco

A mistura profunda de solos com ligante a seco (*dry mixing*) é normalmente efetuada de acordo com os princípios estipulados nos fluxogramas da figura 2.14 e da figura 2.15. Como se pode constatar, a adição do ligante ao solo é feita a seco com recurso a ar comprimido. (EN 14679, 2005)

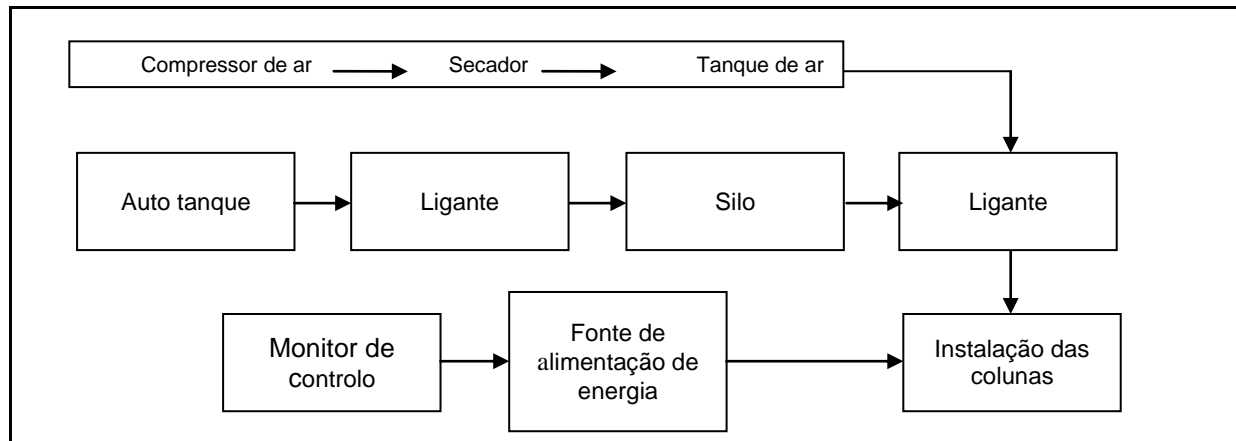


Figura 2.14 – Fluxograma da execução do método seco (adaptado de EN 14679, 2005)

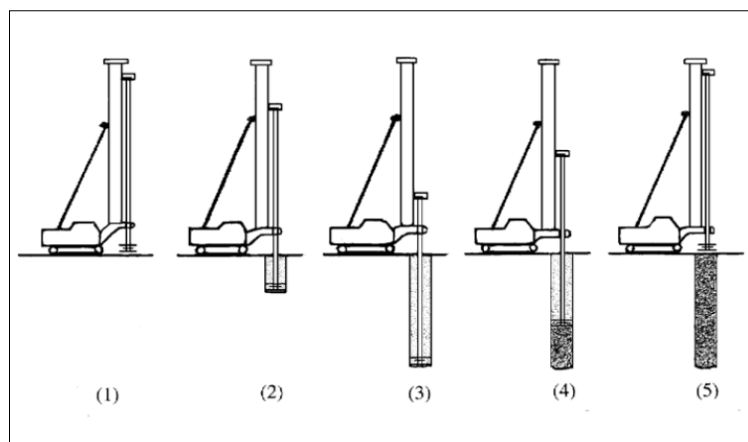


Figura 2.15 – Procedimento de instalação de colunas (adaptado de Essler e Kitazume, 2009)

Acompanhando a figura 2.15:

- 1) o equipamento de mistura é corretamente posicionado;
- 2) o eixo de mistura penetra até à profundidade desejada, com simultânea desagregação do solo pelo equipamento de mistura;
- 3) após atingir a profundidade desejada, o eixo é retirado ao mesmo tempo que o ligante seco é introduzido no solo;
- 4) o equipamento de mistura roda num plano horizontal e mistura o solo e o ligante;
- 5) conclusão da coluna de solo-ligante.

É de notar que a velocidade de rotação da ferramenta de mistura e a velocidade de ascensão são definidas com o objetivo de se atingir uma uniformização das colunas e que, quando se usa o cimento como ligante em vez da cal, é necessária uma maior energia de mistura. O equipamento do método seco consiste basicamente em (Moseley e Kirsch, 2004):

- plataforma fixa ou móvel para o armazenamento do ligante;
- unidade de fornecimento e pré-mistura;
- silos;
- tanques pressurizados;

- compressor de ar;
- filtro;
- mangueiras de ligação;
- equipamento de mistura e administração de ligante ao solo.

O equipamento de mistura e administração de ligante apresenta as seguintes características (Moseley e Kirsch, 2004):

- equipados com 1 ou 2 eixos;
- aquando da utilização de eixos duplos, estes estão unidos numa estrutura metálica transversal aos eixos;
- perpendicularmente ao eixo, existem duas ou mais pás para o processo de mistura.

O equipamento no local de obra (figura 2.16) é composto por uma plataforma de furação e uma plataforma móvel, na qual estão situados os dispositivos de armazenamento do ligante e o compressor. Normalmente, é necessária a construção de uma estação para o processo de pré-mistura, incluindo uma unidade de filtro. O transporte do ligante é assegurado por camiões, desde a estação de pré-mistura até ao local de furação. Existem duas grandes técnicas associadas ao método seco: a Nórdica e a Japonesa (Essler e Kitazume, 2009).

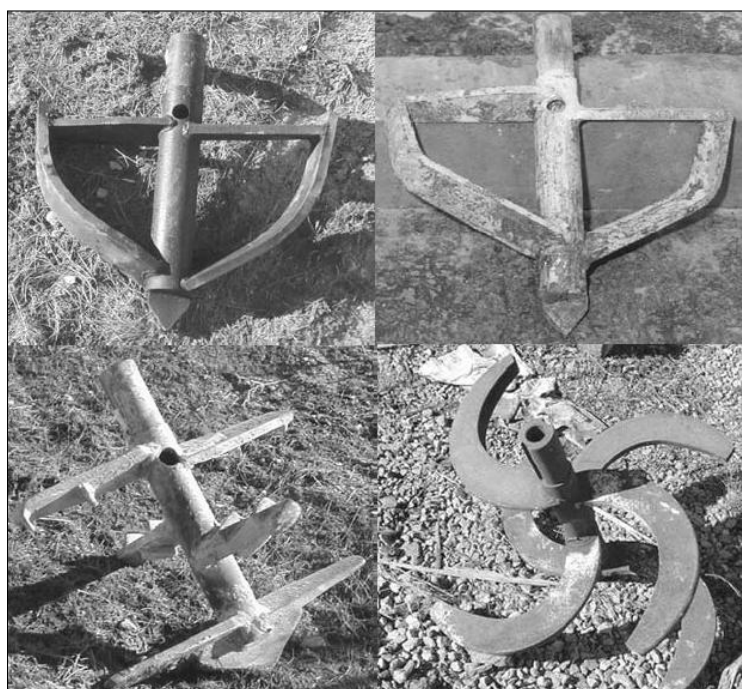


**Figura 2.16 - Equipamento para DSM utilizando a técnica a seco, *Dry Mixing* (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

Na técnica Nórdica, os equipamentos usados já permitiram atingir uma profundidade de coluna até 25 m, diâmetros entre 0,6 a 1,0 m e inclinações na ordem dos 70° com a vertical (Essler e Kitazume,

2009). O equipamento tem um eixo de mistura com a saída de ligante posicionada na ferramenta de mistura propriamente dita (pás - figura 2.17). A energia de mistura e quantidades de ligante são monitorizados e, em alguns casos, automaticamente controlados para se obter a uniformidade adequada do solo melhorado.

A ferramenta de mistura é introduzida no terreno até à profundidade definida e o ligante, também em quantidade previamente definida, é adicionado através de um tubo localizado dentro do eixo com abertura nas pás. Durante a fase de recuperação ou extração, o solo e o ligante são misturados por movimento contínuo giratório do equipamento, que eventualmente pode mudar de direção várias vezes (homogeneização).



**Figura 2.17 - Equipamento de mistura para método seco: técnica Nórdica (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

Existem muitas variações de equipamentos na execução da técnica Japonesa, também chamada de *Dry Jet Mixing*, que podem ter um ou dois eixos. Segundo Essler e Kitazume (2009), cada eixo de mistura tem várias pás, com 0,8 a 1,3 m de diâmetro, e já se construíram colunas com profundidades na ordem dos 30m. O ligante, que normalmente é o cimento, é conduzido com ajuda de ar comprimido. O eixo está coberto por uma manga que evita dispersões de ar. O equipamento é composto por várias aletas empilhadas que, em conjunto com a pressão de ar e quantidades de ligante automaticamente controladas, contribuem para a uniformização e homogeneidade das colunas pretendidas (figura 2.18). O ligante é introduzido no solo durante a fase de penetração ou durante as duas fases, penetração e recuperação.

Nas tabela 2.3 e tabela 2.4 faz-se uma comparação das duas técnicas do método seco quanto ao material e equipamento.

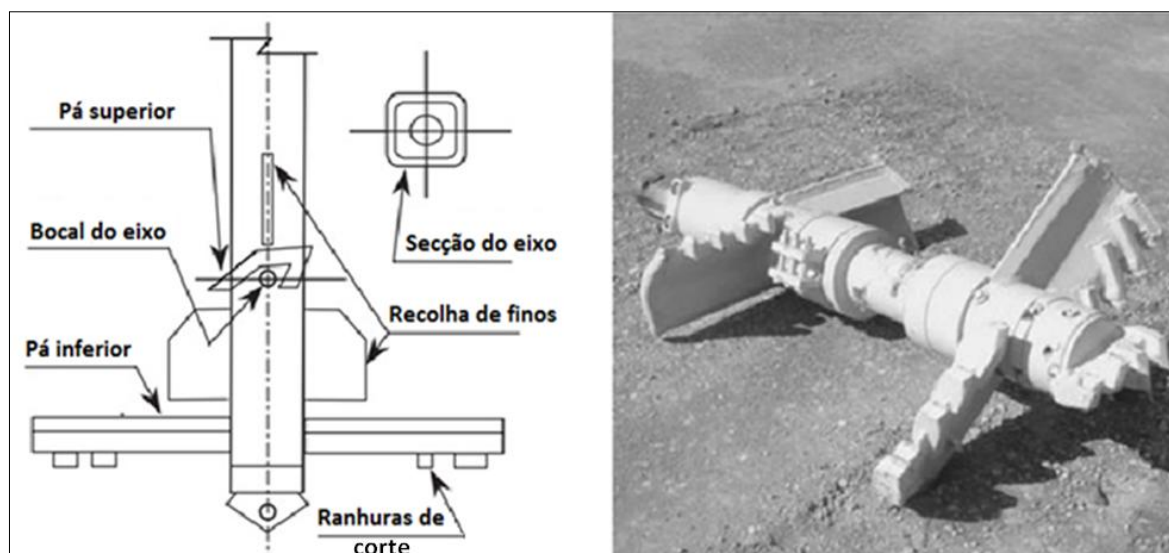


Figura 2.18 – Equipamento de mistura para o método seco: técnica Japonesa (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)

Tabela 2.3 - Comparação do equipamento do método seco na técnica Nórdica e Japonesa (adaptado de EN 14679, 2005)

Equipamento	Detalhes	Técnica Nórdica	Técnica Japonesa
Mistura	Número de eixos	1	1 a 2
	Diâmetro	0,6 a 1,0 m	0,8 a 1,3 m
	Profundidade de tratamento máxima	25 m	33 m
	Posição da saída de ligante	Final do eixo (único)	Final do eixo e/ou pás misturadoras
	Pressão de injeção	400 kPa a 800 kPa	Máximo 300 kPa
Central de alimentação	Capacidade de alimentação	0,5 kN/min a 3 kN/min	0,5 kN/min a 2 kN/min

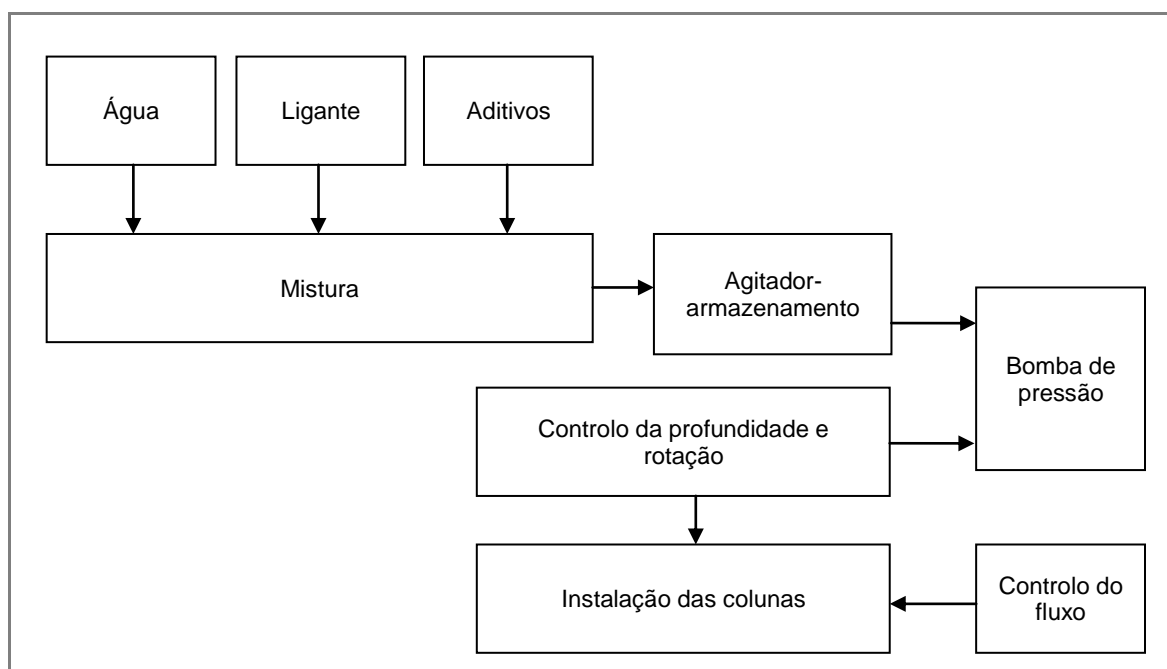
Tabela 2.4 - Valores típicos da execução do método seco na técnica Nórdica e Japonesa (adaptado de EN 14679, 2005)

Equipamento de mistura	Técnica Nórdica	Técnica Japonesa
Velocidade de penetração do eixo	2,0 a 6,0 m/min	1,0 a 2,0 m/min
Velocidade de recuperação do eixo	1,5 a 6,0 m/min	0,7 a 0,9 m/min
Velocidade de rotação das pás misturadoras	100 a 200 rotações/min (rot/min)	24 a 64 rot/min
Quantidade de ligante	1 a 2,5 kN/m <sup>3</sup>	1 a 3 kN/m <sup>3</sup>
Taxa de recuperação/penetração	10 a 30 mm/rot	10 a 35 mm/rot
Fase de alimentação de ligante	Normalmente durante a recuperação	Penetração e/ou recuperação



### **Método húmido**

A técnica *Deep Soil Mixing* por via húmida (*wet mixing*) é realizada de acordo com os princípios gerais descritos no fluxograma da figura 2.19. O ligante é normalmente uma calda de cimento e, quando necessário, adicionam-se agregados que costumam ser areia ou outros aditivos. A quantidade específica de calda de cimento varia com a profundidade. Para equipamentos com o orifício de administração de ligante abaixo da ferramenta de mistura, a calda não deve ser adicionada ao solo durante a fase de recuperação (EN 14679, 2005).



**Figura 2.19 - Fluxograma da execução da técnica por via húmida (adaptado de EN 14679, 2005)**

Considerando que um trado contínuo pode ser suficiente para solos predominantemente granulares, quando estes se tornam mais finos ou rígidos requerem equipamentos e ferramentas de mistura mais complexas, dotadas de pás cortantes de diferentes formatos e arranjos. As unidades rotativas à volta do eixo devem ter poder suficiente para destruir a matriz do solo para uma mistura adequada com a calda.

Dependendo do tipo de solo, é criada uma mistura do tipo argamassa, que endurece durante o processo de hidratação. A resistência e permeabilidade dependem fortemente da composição do solo (teor de finos, teor orgânico, tipo de argila, forma, tamanho, distribuição e dureza dos grãos), da quantidade e tipo de ligante e do procedimento de mistura.

O procedimento de construção de uma coluna é semelhante ao do método seco. Durante a penetração do eixo até à profundidade desejada, as pás misturadoras em baixo do eixo de rotação cortam e destroem o solo original, reduzindo a sua resistência. Ao mesmo tempo, o agente ligante é forçado a entrar no solo a um fluxo constante. Na fase de subida ou recuperação, as pás

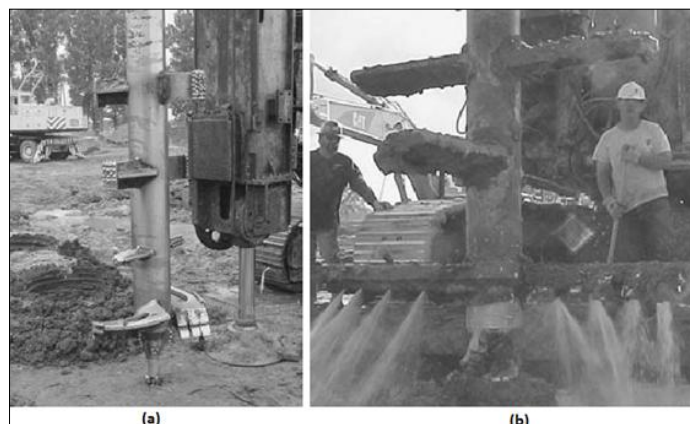
misturadoras rodam inversamente num plano horizontal misturando o solo com o ligante. O processo por via húmida pode ser interrompido e retomado, na condição de que o material ainda não tenha endurecido (Moseley e Kirsch, 2004).

A execução de colunas por via húmida (*wet mixing*) requer vários equipamentos:

- armazenamento e fornecimento de ligantes:
  - silos;
  - tanque de água;
  - sistema de dosagem;
  - tanque de armazenamento temporário com pás giratórias em constante movimento;
  - unidades de abastecimento;
- equipamento de mistura (figura 2.20 e figura 2.21):
  - trado único ou múltiplo;
    - eixos equipados com pás misturadoras;
    - eixos ligados entre si por uma estrutura metálica transversal ou suspensos;
    - possibilidade dos vários eixos rodarem em sentidos diferentes;
  - ferramentas de mistura dispostas em paralelo através de bandas conjuntas dispostas em intervalos verticais ao longo dos eixos;
  - o espaçamento entre trados/eixos pode ser ajustado para a produção de colunas sobrepostas.

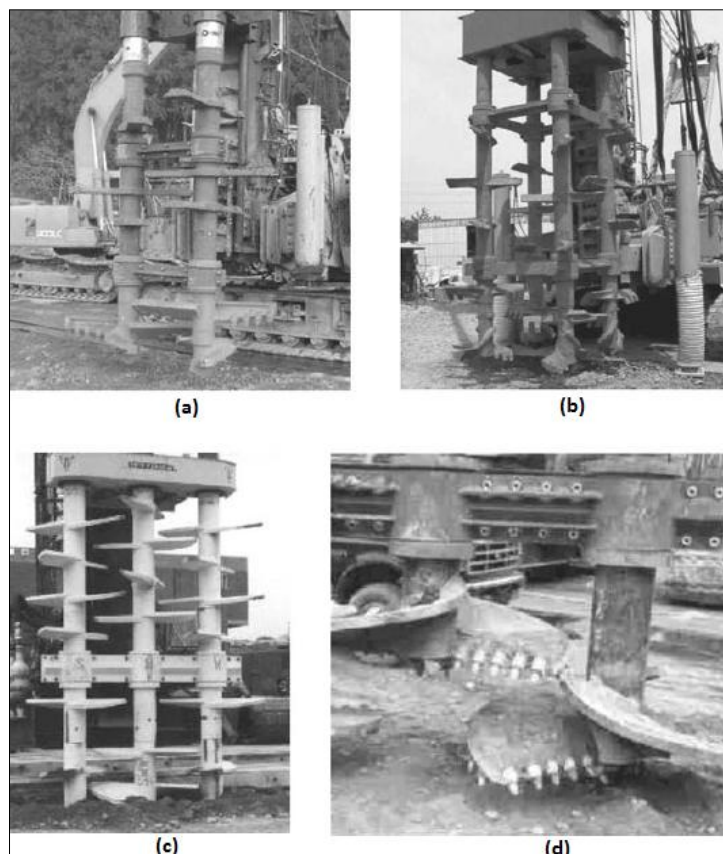
A tecnologia por via húmida é comum na Europa Central e do Sul, América do Norte e Japão (Essler e Kitazume, 2009).

Na técnica europeia, a instalação de colunas com o método húmido é realizada por meio de eixos/trados (contínuos ou não, simples ou múltiplos) com aletas ou pás acopladas, dependendo das condições do solo e aplicação da técnica.



(a) diâmetro de 0,8 m; (b) diâmetro de 2,4 m

**Figura 2.20 – Eixos simples (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**



(a) duplos 2x1 m; (b) quádruplos 4x1 m; (c) triplos 3x 1,5 m, equipamento comum na construção de painéis de contenção de escavações SMW; (d) cabeça de corte

**Figura 2.21 – Eixos múltiplos (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

A técnica Japonesa por via húmida tem sido usada com frequência para obras tanto em terra como em condições marinhas. Nas construções terrestres (figura 2.22 e figura 2.23), têm sido usados equipamentos com um, dois ou quatro eixos de mistura. A ferramenta de mistura é constituída por várias pás empilhadas para se conseguir obter uniformidade. Segundo Essler e Kitazume (2009), essas pás podem ter um diâmetro de 1 m, construindo colunas com uma área da sua secção entre os 0,8 e os 1,5 m<sup>2</sup> e já foram atingidas profundidades de tratamento na ordem dos 40 m.

Os equipamentos compostos por dois eixos misturadores costumam ter uma chapa metálica ligando-os, que ajuda na otimização do grau de mistura. Os equipamentos com um eixo único têm uma aleta, ou pá extra, com mais 10 cm que as outras aletas para melhor se obter essa otimização.

Em construções e obras marinhas são usadas embarcações de transporte de equipamentos para o melhoramento de grandes volumes de solo (figura 2.24). Na embarcação são instalados uma misturadora, uma doseadora, tanques de armazenamento e equipamentos de controlo. Os equipamentos de DSM usados em construções marinhas têm, normalmente, mais de dois eixos de mistura. No Japão, estas máquinas de DSM conseguem construir colunas com uma área de 1,5 a 6,9 m<sup>2</sup> e com uma profundidade, a partir do nível do mar, de 70m (Essler e Kitazume, 2009).

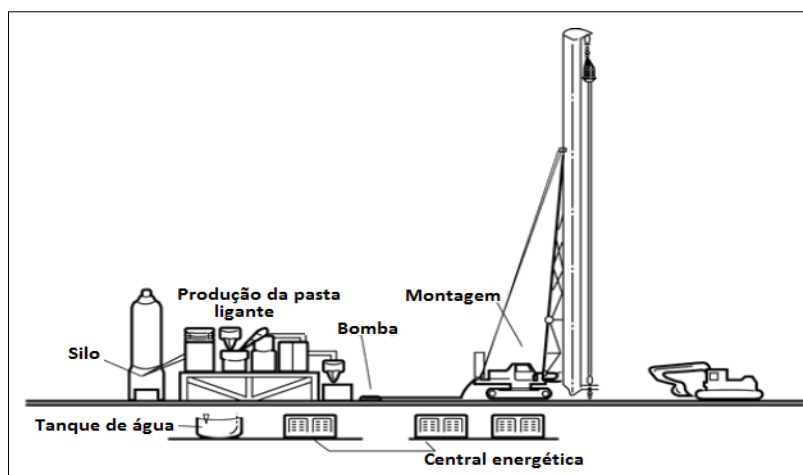


Figura 2.22 - Esquema exemplificativo de um equipamento de DSM para obras terrestres (adaptado de Essler e Kitazume, 2009)

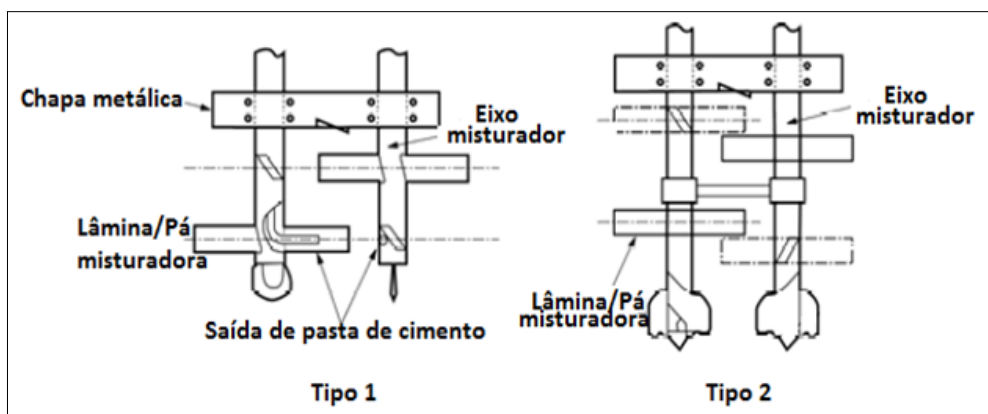


Figura 2.23 - Esquema exemplificativo de aletas de DSM para obras terrestres (adaptado de Essler e Kitazume, 2009)

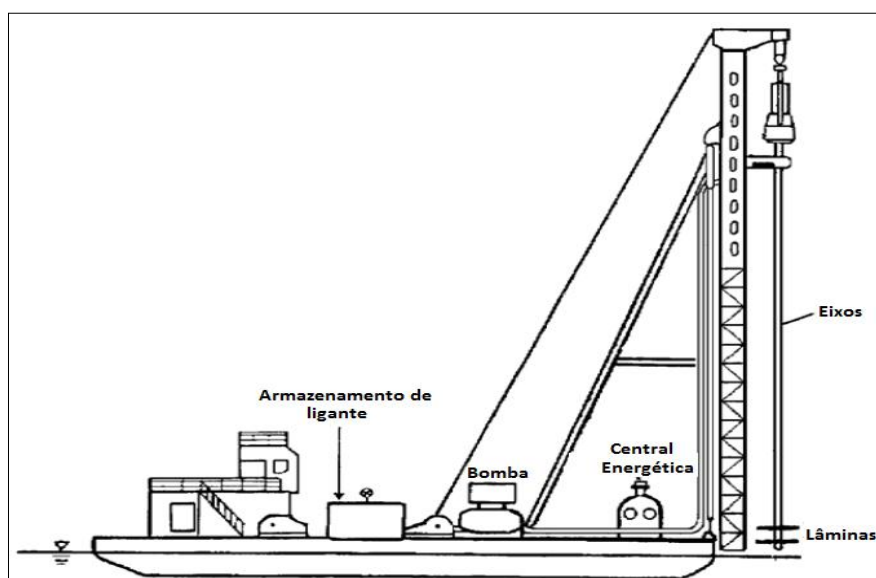


Figura 2.24 - Esquema de embarcação Japonesa para execução de DSM para obras no mar (adaptado de Essler e Kitazume, 2009)

Nas tabela 2.5 e tabela 2.6, faz-se uma comparação das técnicas Europeia e Japonesa por via húmida quanto ao equipamento e valores de execução.

**Tabela 2.5 - Comparação do equipamento para o método húmido nas técnicas Europeia e Japonesa (adaptado de EN 14679, 2005)**

Equipamento	Detalhes	Europeia (terrestre)	Japonesa (terrestre)	Japonesa (marítima)
Mistura	Número de eixos	1-3	1-4	2-8
	Diâmetro	0,4-0,9 m	1,0- 1,3 m	1,0- 1,6 m
	Profundidade de tratamento máxima	25 m	48 m	70 m abaixo do nível do mar
	Posição da saída de ligante	Eixo	Eixo e aletas	Eixo e aletas
	Pressão de injeção	500 kPa a 1000 kPa	300 kPa a 600kPa	300 kPa a 800kPa
Central de alimentação	Armazenamento de calda	3 m <sup>3</sup> -6 m <sup>3</sup>	3 m <sup>3</sup>	3 m <sup>3</sup> -20 m <sup>3</sup>
	Capacidade de alimentação	0,08m <sup>3</sup> /min-0,25m <sup>3</sup> /min	0,25m <sup>3</sup> /min-1m <sup>3</sup> /min	0,5 m <sup>3</sup> /min-2 m <sup>3</sup> /min
Tanque de armazenamento	Capacidade máxima	-	300 kN	500 kN-16000 kN

**Tabela 2.6 - Valores típicos da execução para o método húmido nas técnicas Europeia e Japonesa (adaptado de EN 14679, 2005)**

Equipamento de Mistura	Europeia (terrestre)	Japonesa (terrestre)	Japonesa (marítima)
Velocidade de penetração do eixo	0,5-1,5 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min
Velocidade de recuperação do eixo	3,0-5,0 m/min	0,7-1,0 m/min	1,0 m/min
Velocidade de rotação das pás misturadoras	25-50 rot/min	20-40 rot/min	20-60 rot/min
Quantidade de ligante	0,8-4,5 kN/m <sup>3</sup>	0,7-3 kN/m <sup>3</sup>	0,7-3 kN/m <sup>3</sup>
Fase de alimentação de ligante	Penetração e/ou recuperação	Penetração e/ou recuperação	Penetração e/ou recuperação

Na presente dissertação, a técnica DSM é abordada fundamentalmente no âmbito da construção de painéis para a contenção de escavações. Escolheu-se para o estudo a técnica específica *Deep Soil Mixing* por via húmida (*wet mixing*), em que o ligante a ser discutido com mais pormenor é o cimento.

## 2.6 Vantagens e limitações

Quando se avaliam as vantagens e limitações da técnica geral *Soil Mixing* deve ter-se em conta que estas dependem do tipo de aplicação, técnica específica (*deep, shallow, wet, dry, etc.*) e equipamentos usados, pois com estas variações conseguem-se vários padrões de colunas/painéis e diferentes parâmetros do solo tratado. No entanto, em termos gerais, e comparando com outras

técnicas competitivas de melhoramento de terrenos, apresentam-se na tabela 2.7 várias vantagens e limitações da técnica *Deep Soil Mixing* (Moseley e Kirsch, 2004).

**Tabela 2.7 - Principais vantagens e limitações da técnica DSM (adaptado de Moseley e Kirsch, 2004)**

Principais vantagens	Principais limitações
Elevada produtividade Viabilidade económica para projetos a grande escala e grandes volumes de solo.	Profundidade de melhoramento limitada (depende do método aplicado).
Possibilidade de utilização numa vasta gama de solos.	Não aplicável a solos muito densos e rijos ou com presença de calhaus e blocos.
Possibilidade de ajustar as propriedades geotécnicas do material às exigências do projeto.	Limitação ou impossibilidade de tratamento de terrenos mediante a instalação de colunas subverticais ou inclinadas (depende do método).
Reduzidos impactes ambientais.	No método <i>Wet Mixing</i> pode haver desperdícios consideráveis no refluxo.
Pode ser usada tanto em terra como em condições aquáticas.	Condições de gelo-degelo ou molhagem-secagem podem provocar degradação das colunas
Possibilidade de verificação da qualidade do tratamento durante a construção.	Homogeneidade e qualidade da mistura do solo podem ser muito variáveis.
Não produz vibração no solo, produção de nível de ruído médio a baixo.	A robustez e peso do equipamento podem ser problemáticos em solos muito moles (dependendo do método).
Baixos valores de tensão vertical/horizontal sobre estruturas adjacentes ao local do tratamento.	
Padrão e espaçamento das colunas adaptam-se face às necessidades impostas em cada caso.	

Dependendo do tipo de solo a ser tratado, podem surgir dois fenómenos que requerem atenção (Sousa, 2009):

- Efeito saca-rolhas

Este fenómeno está associado a solos muito finos como siltes e argilas. Devido à elevada coesão do solo, este pode aderir ao equipamento (figura 2.25), não se conseguindo efetuar a mistura. Para a anulação deste efeito, recorre-se à adição de agregados antes da fase de recuperação do equipamento.

- Efeito de abrasão

Quando se está perante solos muito grosseiros, pode ocorrer um certo desgaste da ferramenta de mistura e corte. Pode não se dar o caso de abrasão extrema, onde se perde a secção da ferramenta, mas como se verificam grandes vibrações do equipamento, o esforço mecânico e dinâmico pode resultar em custos elevados de manutenção.



Figura 2.25 - Aderência de material à ferramenta de DSM - Efeito saca-rolhas (adaptado de Falk e Sigmud, 2009 in Sousa, 2009)

## 2.7 Exemplos de aplicação prática

Foram selecionados 3 casos diferentes para exemplificar a utilização da técnica DSM em obras correntes com o objetivo de evidenciar alguns parâmetros de projeto já atingidos, comparando os requisitos iniciais com o resultado final (tabela 2.8, tabela 2.9 e tabela 2.10)

Tabela 2.8 - Exemplo de aplicação: Construção de um aterro para uma via de um metropolitano no Japão

Local	Kawashima, Japão (Metropolitano)
Obra	Aterro com uma média de 8 m de altura, 100 m de comprimento e 47,6-57,5 m de largura. Redução de assentamentos e estabilidade de taludes.
Solo	Camada I: 5-7 m de solo argiloso mole Camada II: 3,3-5,4 m de solo arenoso Camada III: 9-13,5 m de solo argiloso
Requisitos de projeto	Assentamentos de 30 cm
Metodologia	<i>Dry Jet Mixing</i> com dois eixos de mistura
Colunas	Diâmetro: 1 m; Profundidade: 20-22 m
Geometria	Redução de assentamentos: colunas individuais com espaçamento de 1,5x1,7 m; Estabilidade dos taludes: colunas sobrepostas (0,8m) com espaçamento de 1,45m entre alinhamentos.
Ligante	Escórias de alto-forno de cimento do tipo B. Camada I: 1,5 kN/m <sup>3</sup> ; Camada II: 1,1 kN/ m <sup>3</sup> ; Camada III: 1,25 kN/ m <sup>3</sup> .
Avaliação	Assentamentos de 29 cm.
Fonte	Moseley e Kirsch, 2004.

**Tabela 2.9 - Exemplo de aplicação: Controlo e contenção de uma escavação utilizando uma VERT Wall no Texas**

Local	Texas, EUA
Obra	Controlo e contenção de uma escavação. VERT Wall com plataforma de ligação no topo das colunas, reforço da frente do painel.
Solo	Areia com intercalações de argila com as seguintes características: resistência de ponta $q_c$ no ensaio CPT de 6 MPa; ângulo de resistência ao corte de 32°; peso volumico 18 kN/m <sup>3</sup> e teor em água de 15%. O nível freático encontra-se a 7,2 m de profundidade.
Requisitos de projeto	Resistência à compressão uniaxial da mistura de 690kPa aos 28 dias.
Metodologia	<i>Wet Mixing</i>
Colunas	Diâmetro: 0,91 m; Profundidade: 8,5 m.
Geometria	Contenção 9,5 m de profundidade, 40 m de extensão e 5,6 m de espessura. Uma linha com 43 colunas contínuas na frente de escavação com 0,91 m de diâmetro; imediatamente atrás outra linha de colunas foi construída com distâncias centrais de 1,82m; e uma 3ª e 4ª linha com distâncias centrais também de 1,82 m. À superfície foi construída uma plataforma de alívio com 1 m de espessura, com os excedentes de calda.
Ligante	Cimento. Calda com relação A/C de 1,75:1
Avaliação	Das amostras de solo-cimento recolhidas a várias profundidades e ao 3º, 7º, 28º e 56º dia, verificou-se que o valor mais baixo de resistência ao 28º dia foi duas vezes mais elevado que o estipulado em fase de projeto.
Fonte	Briaud <i>et al</i> , 2000.

**Tabela 2.10 - Exemplo de aplicação: Reforço de fundação de muros de suporte de aterro, Autoestrada do Marão**

Local	Marão, Portugal
Obra	Reforço a fundação de muros de suporte de plataforma de aterro na Autoestrada do Marão.
Solo	Solo arenoso
Requisitos de projeto	Resistência: 400kPa; Deformabilidade: 1,5 GPa.
Metodologia	DSM ( <i>Cutter Soil Mixing</i> ).
Painéis	Construídos não com colunas mas com a composição de vários painéis de <i>Cutter Soil Mixing</i> efetuados com equipamento do tipo fresa. Secção: 2,4x0,9 m <sup>2</sup> , Malha de 4,4x2,9 m <sup>2</sup> .
Ligante	Cimento.
Avaliação	Comprovou-se que aos 28 dias os valores de resistência e deformabilidade estipulados em projeto já tinham sido ultrapassados.
Fonte	Pinto <i>et al</i> , 2010.



## 3 Propriedades da mistura solo-ligante

### 3.1 Generalidades

No âmbito das aplicações de soluções de misturas solo-ligante, como o *Deep Soil Mixing*, torna-se importante estudar as propriedades físico-mecânicas das misturas em função da variação de componentes (água, ligante e solo), a fim de se determinar qual a mistura mais adequada para determinado caso.

É então indispensável, numa fase inicial de projeto, um estudo laboratorial, com o objetivo de analisar quais as características da mistura mais adequada para aplicar em obra, como por exemplo, as quantidades e tipo de ligante, a quantidade de água e os procedimentos de mistura (tipo de ferramentas e velocidade de rotação).

Neste estudo laboratorial deve procurar reproduzir-se as condições de campo, tendo sempre em conta as condições de mistura e de cura, analisando assim o seu desempenho.

Neste estudo, e após a criação de diversos provetes com variações na relação solo/água/ligante, realizam-se vários ensaios, como por exemplo, ensaios de resistência à compressão uniaxial, ensaios de resistência ao corte e ensaios de permeabilidade. A preparação das amostras em laboratório deve obedecer a determinados critérios de modo a garantir a homogeneidade (Correia *et al*, 2008, in Correia 2011).

Deve ter-se atenção para não sobrevalorizar as resistências das misturas obtidas em laboratório e analisá-las cuidadosamente. Estas tendem a ser mais elevadas que as que podem ser obtidas no campo, já que a técnica tende a ser mais eficaz em laboratório, devido a fatores como o efeito de escala, o facto de as amostras serem remexidas e a temperatura a que é realizada a mistura. A resistência obtida em colunas construídas no campo pode apresentar valores de entre 20% a 50% da obtida em amostras misturadas em laboratório (EuroSoilStab, 2001).

No caso do dimensionamento de uma contenção de escavação utilizando soluções de solo-ligante, é importante saber quais as propriedades finais do material a nível da resistência, deformabilidade e permeabilidade, propriedades que serão abordadas neste capítulo.

### 3.2 Ligantes

#### 3.2.1 Seleção do ligante

Os ligantes mais comuns utilizados na mistura de solos em profundidade (*Deep Soil Mixing*) são o cimento Portland e a cal viva, sozinhos ou em misturas. No entanto, segundo Correia (2011), desde os anos 90 do século passado, tem havido um desenvolvimento na aplicação de novos ligantes,

determinado por razões técnico-económicas e/ou ambientais, sendo hoje frequente a utilização de cinzas volantes ou escórias granuladas de alto-forno, entre outros, em combinação com o cimento Portland. Como já foi referido anteriormente, a técnica *Deep Soil Mixing* apresenta inúmeras classificações e designações de variantes da técnica inicial. Na tabela 3.1 apresenta-se uma classificação da técnica, segundo o ligante.

**Tabela 3.1 - Classificação da técnica *Deep Soil Mixing* segundo o ligante utilizado (adaptado de Kempfert e Gebreselassie, 2006)**

Forma	Condução do ligante ao solo	Método	Ligante
<b>Seca (Dry)</b>	Mecânica (Trado)	DLM - <i>Deep Lime Mixing</i>	cal
	Pneumática (Ar Comprimido)	DJM – <i>Dry Jet Mixing</i> (Técnica Japonesa)	cal
		Técnica Nórdica	cal/cimento
		DJM – <i>Dry Jet Mixing</i> (Técnica Japonesa)	cimento
<b>Húmida (Wet)</b>	Bombeamento (em pasta fluida)	CDM – <i>Cement Deep Mixing</i>	cimento
		Técnica Europeia – Comtrado contínuo oco	cimento

De acordo com a norma EN 14679 (2005), na mistura por via seca, o ligante mais apropriado pode ser a mistura entre cimento e cal (viva), podendo também ser utilizadas combinações de cimento, cal, gesso, escória de alto-forno ou cinzas volantes. Na mistura de solos em profundidade por via húmida, o ligante mais comum é o cimento. O resultado final da mistura, designado de solo-ligante, é um material estrutural em que a percentagem de ligante lhe confere propriedades semelhantes a uma rocha branda.

A seleção de um ligante para o melhoramento de solos com técnicas de mistura vai sempre depender das características do solo inicial e das do próprio ligante, pois determinam o tipo de ligações físico-químicas estabelecidas entre o solo, o ligante e a água. É importante que o ligante produza reações com o solo que contribuam para o melhoramento das características geotécnicas deste. Por exemplo, em solos do tipo lamas ou turfa, a adição de cal terá pouco ou nenhum efeito, devido à escassez de minerais pozolânicos nestes solos e porque, eventuais reações pozolânicas, podem ser inibidas por ácidos húmicos resultantes da decomposição de animais ou plantas. Os minerais pozolânicos são minerais siliciosos ou siliciosos e aluminosos que, por si próprios, não possuem ou possuem pouco valor cimentício, mas que, na forma finamente dividida e na presença de humidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas correntes, para formar compostos detentores de propriedades cimentícias (Axelsson *et al*, 2002). Por outro lado, a cal pode ser eficaz em argilas e siltes, livres de conteúdo orgânico, mas contendo esses minerais (Janz e Johansson, 2002). Em solos

com matéria orgânica poderá ser conveniente a utilização de agregados, pois aumenta-se o número de partículas possíveis a que o ligante se pode unir, contribuindo para a redução de custos, pois para o mesmo grau de melhoria, é exigida uma menor quantidade de ligante.

Devem ainda ser tidos em conta eventuais impactos ambientais associados à escolha do ligante.

Um dos métodos existentes para selecionar o ligante é o método da *U.S Army Corps of Engineers* (Muhunthan e Sariosseiri, 2008). O método é apresentado na figura 3.1 e tabela 3.2 complementar, onde a escolha do ligante mais adequado se baseia na análise granulométrica e limites de Atterberg do solo.

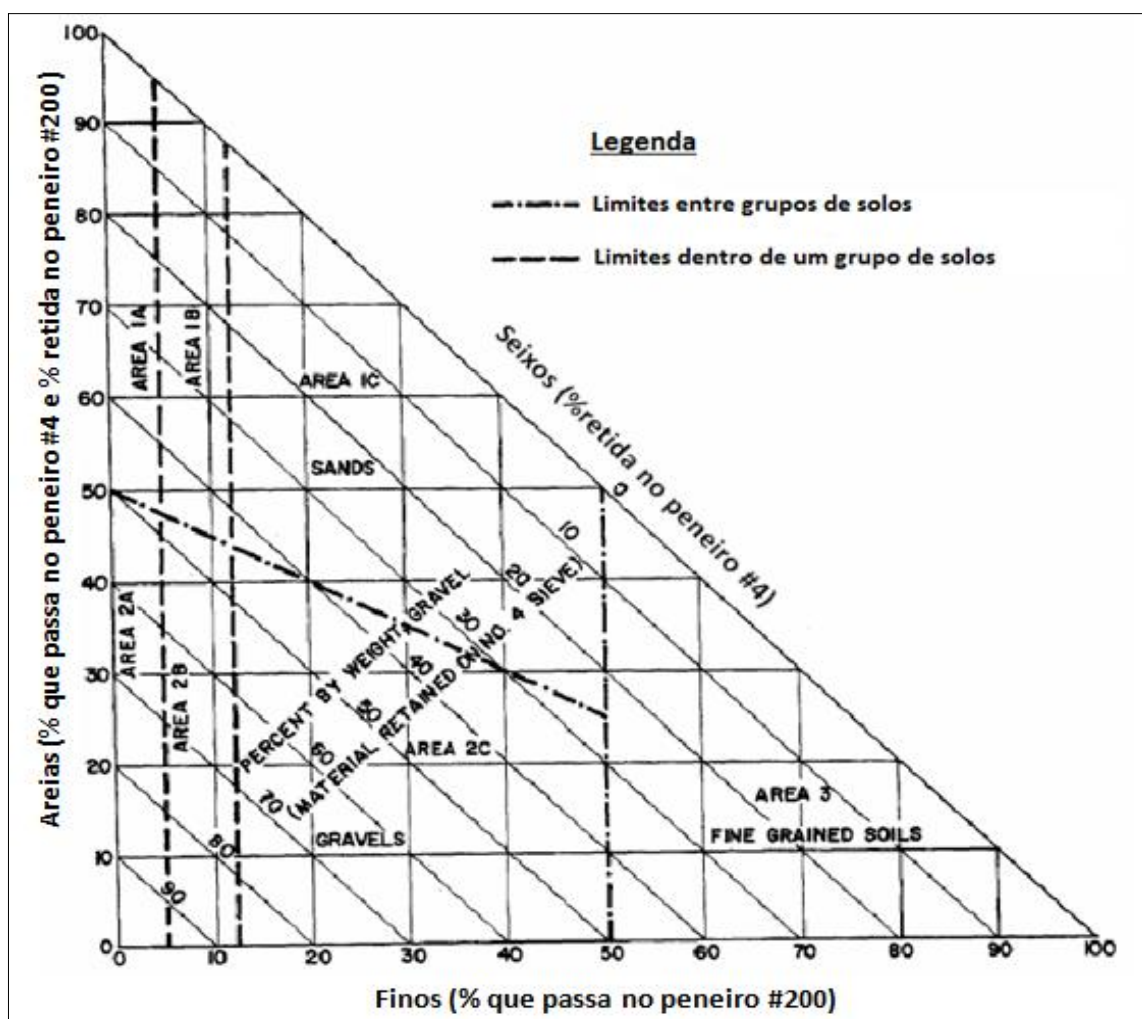


Figura 3.1 - Ábaco triangular para a seleção do ligante (adaptado de Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

**Tabela 3.2 - Guia complementar do ábaco da figura 3.1 (\*=  $IP \leq 20 + 1/4 \times (\% \text{ passa no } \#200)$ ); (adaptado de Muhunthan e Sariosseiri, 2008)**

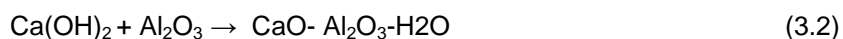
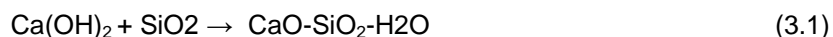
Área	Classificação do solo	Ligante recomendado	Restrição do IP e $w_L$	Restrição na % que passa no peneiro #200	Observações
1A	SP ou SW	Betuminoso	-	-	-
		Cimento Portland	-	-	-
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
1B	SW-SM ou SP-SM SW-SC ou SP-SC	Betuminoso	$IP < 10$	-	-
		Cimento Portland	$IP < 30$	-	-
		Cal	$IP < 12$	-	-
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
1C	SM ou SC ou SM-SC	Betuminoso	$IP < 10$	$< 30\%$	-
		Cimento Portland	*	-	-
		Cal	$IP > 12$	-	-
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
2A	GW ou GP	Betuminoso	-	-	Só material bem graduado
		Cimento Portland	-	-	Pelo menos 45% do solo deve passar no peneiro #4
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
2B	GW-GM ou GP-GM GW-GC ou GP-GC	Betuminoso	$IP < 10$	-	Só material bem graduado
		Cimento Portland	$IP < 30$	-	Pelo menos 45% do solo deve passar no peneiro #4
		Cal	$IP > 12$	-	-
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
2C	GM ou GC ou GM-GC	Betuminoso	$IP < 10$	$< 30\%$	Só material bem graduado
		Cimento Portland	$b^*$	-	Pelo menos 45% do solo deve passar no peneiro #4
		Cal	$IP > 12$	-	-
		Cal-cimento-cinzas volantes	$IP < 25$	-	-
3	CH ou CL ou MH ou ML ou OH ou OL ou ML-CL	Cimento Portland	$w_L < 40$ e $IP < 20$	-	Solos orgânicos e solos fortemente ácidos não são susceptíveis de melhoramento pelos meios comuns
		Cal	$IP > 12$	-	-

### 3.2.2 Cal

Os tipos de ligante à base de cal mais usados em Geotecnia são a cal hidratada  $Ca(OH)_2$ , a cal monohidratada  $Ca(OH)_2MgO$ , a cal viva  $CaO$  e a cal viva dolomítica  $CaO MgO$  (Muhunthan e Sariosseiri, 2008).

Os efeitos da cal no solo podem ser classificados em dois grupos: imediatos e a longo prazo (EN 14679, 2005). O aumento da trabalhabilidade do solo, função da diminuição do índice de plasticidade, é resultado de uma alteração imediata, que é fundamental na fase de construção. O ganho de resistência é considerado alteração de longo prazo, que ocorre durante e após a cura.

Quando a cal é misturada com material argiloso, na presença da água, várias reações acontecem. Estas incluem a troca de catiões, floculação-aglomeração, reações pozolânicas e carbonatação. As duas primeiras acontecem imediatamente após a mistura e alteram o índice de plasticidade, a trabalhabilidade e o ganho de resistência. As reações pozolânicas (equações 3.1 e 3.2) dão-se ao longo do tempo entre a cal, a sílica e o alumínio dos minerais de argila presentes no solo, produzindo materiais cimentícios. Em função destas reações, são várias as propriedades geotécnicas dos solos que se alteram, tal como as características de compactação, potencial de expansibilidade, resistência ao corte e relação tensão-deformação (Muhunthan e Sariosseiri, 2008).



A adição de cal ao solo aumenta o seu pH segundo Muhunthan e Sariosseiri (2008). Quando o pH do solo aumenta até 12.4, a solubilidade da sílica e do alumínio aumentam significativamente. Portanto, desde que haja cálcio suficiente e o pH permaneça nos 12.4, as reações pozolânicas continuarão a dar-se.

A cal proporciona melhores resultados em solos argilosos, especialmente aqueles que possuem um índice de plasticidade moderado a alto ( $IP > 15\%$ ). A fim de se usar cal em siltes e materiais granulares, se os aluminatos e silicatos não forem componentes dos mesmos, são necessários aditivos pozolânicos, como por exemplo, cinzas volantes. Muhunthan e Sariosseiri (2008) sugerem que o domínio de aplicabilidade inclua solos com a classificação unificada em linha com o apresentado na tabela 3.2 anterior.

A quantidade de cal necessária varia de acordo com as características do solo a ser melhorado e o grau de melhoramento que se pretende, o qual pode ser avaliado através de ensaios laboratoriais. A definição dessa quantidade varia de autor para autor. Segundo Muhunthan e Sariosseiri (2008), para fins de melhoramento do comportamento mecânico é costume serem usadas quantidades de 5% a 10% do peso seco do solo. Existem também autores que propõem relações matemáticas para calcular a quantidade ótima de cal como por exemplo, Hilt e Davidson (1960) (in Muhunthan e Sariosseiri, 2008) (equação 3.3):

$$\text{Quantidade ótima de cal (\%)} = \frac{\% \text{ de argila}}{35} + 1,25 \quad (3.3)$$

Eades e Grim (1966) (in Lasledj e Al-Mukhtar, 2008) sugeriram que a quantidade mínima de cal necessária ao melhoramento das propriedades mecânicas é aquela que consegue manter um pH de, pelo menos 12.4, para se manterem as reações pozolânicas. Uma vez que estes últimos métodos são predominantemente empíricos, serão sempre necessários ensaios laboratoriais para a determinação da quantidade ideal para um dado solo e tendo sempre em conta as condições *in situ*.

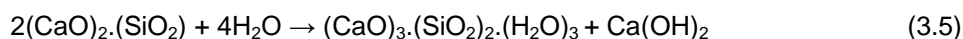
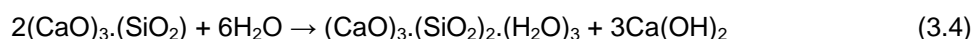
A cal é o ligante que está mais associado à técnica *Dry Deep Mixing*. Segundo a norma EN 14679 (2005) e tal como descrito no capítulo anterior (secção 2.5.2), as quantidades de ligante recomendadas para *Dry Deep Mixing* são de 1 a 2,5 kN/m<sup>3</sup> para a técnica Nórdica e de 1 a 3 kN/m<sup>3</sup> para a Japonesa.

### 3.2.3 Cimento

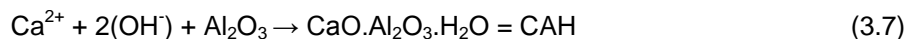
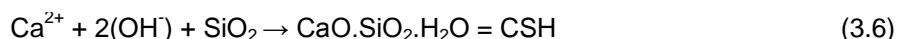
Segundo a norma europeia EN 197 (2000), o cimento define-se como sendo: ligante de origem mineral, constituído por silicatos e aluminatos de cálcio que se apresenta sob a forma de pó. Devido às suas características, quando misturado com água forma uma pasta que faz presa, endurece e conserva a sua resistência mecânica e estabilidade, mesmo submerso em água. Qualquer tipo de cimento pode ser utilizado para mistura com solo, mas dos diversos tipos de cimentos, os Portland

são os mais divulgados e utilizados, pois são economicamente viáveis e as suas propriedades satisfazem os eventuais requisitos num melhoramento de solos. Estes cimentos são o resultado do aquecimento e fusão de misturas homogêneas de minerais calcários e argilosos, resultando no produto designado por clínquer, constituído por silicatos e aluminatos anidros. É ainda pulverizado por aditivos como o gesso, para retardamento de presa, já que os aluminatos têm uma presa quase instantânea, o que prejudicaria a utilização prática do cimento.

A aplicação de cimento em misturas com solo leva a reações químicas específicas de hidratação e pozolânicas, melhorando as propriedades mecânicas, trabalhabilidade e características de compactação (Jameson, 1996). A natureza química do cimento Portland comum pode resumir-se a compostos de óxidos de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e também silicato tricálcico (Ca<sub>3</sub>S), silicato dicálcico (Ca<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (Ca<sub>3</sub>Al) e aluminoferrite tetracálcica (Ca<sub>4</sub>AlF). Perante a presença de água, os compostos do cimento hidratam, gerando um gel de sílica e hidróxido de cálcio. As reações iniciais ocorrem com o Ca<sub>3</sub>S e o Ca<sub>2</sub>S, que criam uma camada de gel (Ca<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>) na superfície dos grãos de cimento. As reações de hidratação são as representadas pelas equações 3.4 e 3.5 (Jameson, 1996):



Os minerais de argila presentes no solo compreendem grandes quantidades de sílica cristalina, alumínio e óxidos de magnésio. Estes compostos são ácidos por natureza e bastante reativos. A hidratação do cimento gera fluido alcalino, libertando cálcio e iões hidroxilos na solução (pH>12). A sílica e alumínio presentes nos minerais de argila reagem com estes iões formando sais. Nas equações 3.6 e 3.7 apresentam-se, então, as reações pozolânicas em que os precipitados CSH e CAH são cimentícios e, portanto, contribuem na ligação entre as partículas (Jameson, 1996):



Segundo Moseley e Kirsch (2004), este ligante pode ser recomendado para melhorar praticamente qualquer tipo de solo, havendo algumas exceções em que pode não ser muito eficaz: solos com pH inferior a 5,3, solos altamente orgânicos e argilas muito plásticas. Os solos granulares e argilosos com baixo índice de plasticidade são os que melhor reagem a um melhoramento com cimento. Partículas com um máximo de 20 mm são preferíveis e, no outro extremo, não mais de 50% do solo deve ter dimensões inferiores a 0,18mm. Os solos grossos são também muito apropriados à melhoria com cimento, já que se misturam mais facilmente que os solos finos, sendo assim mais económicos por exigirem menos quantidades de cimento. Solos com 5 a 35% de finos resultam na solução de solo-cimento mais económica. Se o tamanho dos grãos do solo for maior que os do cimento, os grãos

individuais são envolvidos pelo cimento. As partículas de solos coesivos são muito menores que as de cimento e consequentemente é muito difícil o cimento envolvê-las.

Na norma EN 14679 (2005), como foi descrito no capítulo 2.5.2, recomendam-se quantidades de cimento na ordem dos 0,8 a 4,5 kN/m<sup>3</sup> para a técnica Europeia e 0,7 a 3 kN/m<sup>3</sup> na técnica Japonesa. Associando o cimento como ligante principal na técnica *Wet Deep Mixing*, segundo o guia EuroSoilStab (2001), a quantidade de ligante é tipicamente entre os 3 e os 4 kN/m<sup>3</sup> em solos moles para se atingir uma resistência ao corte não drenada *in situ* na ordem de 100 a 150 kPa.

No seguimento dos próximos capítulos, o cimento vai ser o ligante abordado para a prática da técnica *Deep Soil Mixing* na execução de contenções de escavações.

### 3.2.4 Aditivos

Além da cal e do cimento, considerados ligantes principais desta técnica e que permitam obter misturas com combinação dos dois, existem outros produtos químicos ou aditivos que podem otimizar os efeitos da mistura com o solo, sendo adicionados à mistura principal. Podem ser necessárias misturas mais complexas quando, por exemplo, se está na presença de solos orgânicos ou solos muito moles com um teor em água muito alto.

As cinzas volantes são um subproduto industrial, tipo poeiras, resultantes da combustão de carvão pulverizado em centrais termoelétricas e são as pozolanas artificiais mais comuns. Apresentam então propriedades pozolânicas acentuadas, valorizando-se, assim, quando usadas em misturas solo-cimento. Além desta função, as cinzas volantes podem também desempenhar o efeito de agregado, já que as suas partículas são menores que as do cimento, conduzindo à redução de espaços vazios. A forma esférica e superfície pouco rugosa das suas partículas proporcionam baixos coeficientes de atrito, melhorando a trabalhabilidade (Axelsson *et al*, 2002).

A sílica de fumo é também um sub-produto industrial, resultante da preparação do metal silício ou de ligas de silício, em fornos elétricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão a elevadas temperaturas. Sendo também uma pozolana artificial, o facto de conter elevado teor em SiO<sub>2</sub> acelera as reações pozolânicas nos primeiros dias. Tal como as cinzas volantes, as suas partículas finas preenchem vazios, diminuindo a permeabilidade (Janz e Johansson, 2002).

A bentonite é um material formado por minerais argilosos do grupo das esmectites. Este material possui uma baixa condutividade hidráulica, com grande capacidade de expansão. A mistura de água com bentonite resulta num gel com propriedades adesivas e impermeabilizantes. A adição deste material ao cimento vai permitir também uma melhor estabilização da mistura, pois a bentonite provoca a suspensão de partículas do cimento (IMA-Europe, 2012).

### 3.3 Propriedades do solo-cimento

Tal como referido anteriormente, este trabalho está centrado na utilização do cimento como ligante da mistura com o solo. Deste modo, apenas serão aqui referidas as propriedades do material solo-cimento.

Os elementos que se apresentam de seguida baseiam-se em estudos realizados por diversos autores e que foi possível encontrar na bibliografia. Neles, a caracterização das misturas solo-cimento é feita tendo em conta resultados de ensaios sobre provetes fabricados em laboratório e sobre provetes colhidos *in situ*. Relativamente ao primeiro tipo de provetes, foram notórias as dificuldades associadas à análise de aspetos como efeito de escala e amostragem do material.

Na pesquisa bibliográfica realizada foi difícil encontrar estudos satisfatórios realizados com misturas em que o solo fosse areia, não que a técnica não seja eficaz para este tipo de solos, mas pelo facto de, neste tipo de solos, frequentemente se recorrer a soluções alternativas como o *jet grouting*.

#### 3.3.1 Propriedades físicas e químicas

A mistura de solo e cimento produz alterações de várias propriedades físicas e químicas do solo inicial, nomeadamente, a nível do teor em água, peso volúmico, pH, limites de Atterberg e teor em matéria orgânica.

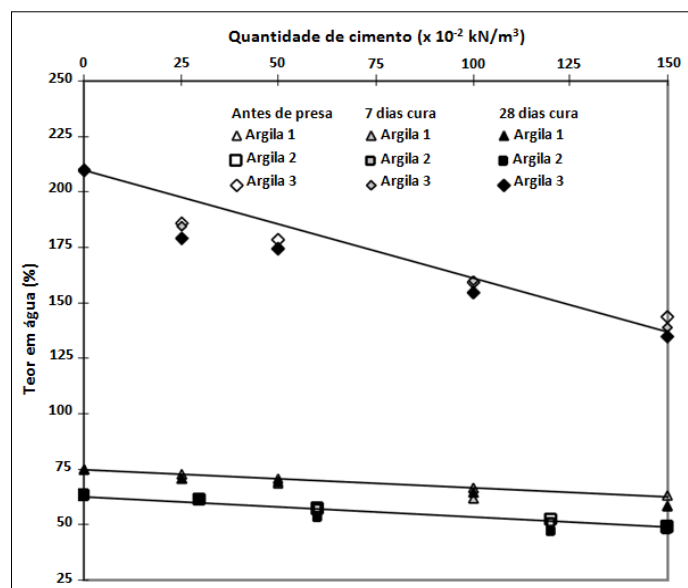
Hassan (2009) estudou, entre outras, estas propriedades em três argilas da Finlândia, cujas características são apresentadas na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Características de três argilas da Finlândia estudadas por Hassan (2009)**

Argila	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	pH	Matéria orgânica (%)	Ligante
1	15,4	74-76	71	30	7	Inorgânica	Cimento Portland CEM II 42,5 N
2	16,2	63	51	26	5,2	Inorgânica	
3	12,3	210	185	59	4,4	8-9	

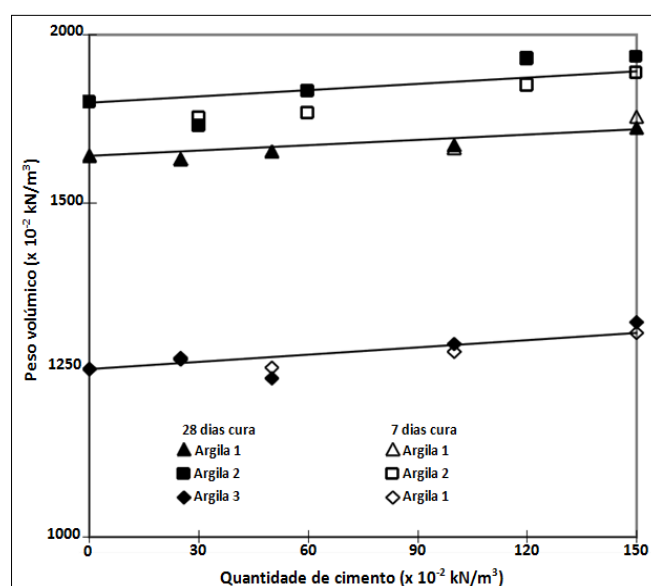
Na figura 3.2 constata-se que a adição do cimento às três argilas finlandesas provocou uma diminuição do teor em água, devido às reações de hidratação iniciais. De facto, nas reações químicas desencadeadas entre cimento, água e solo existe um consumo de água, logo, o novo material poderá apresentar um menor teor em água face ao solo original. Este teor em água tende a diminuir com o aumento do teor em cimento e segue quase que uma relação linear. Da figura, observa-se ainda que a variação de teor em água durante o período de cura é muito ligeira.





**Figura 3.2 – Variação do teor em água de três argilas finlandesas misturadas com várias quantidades de cimento imediatamente após a mistura, com 7 dias de cura e com 28 dias de cura (adaptado de Hassan, 2009)**

O peso volúmico, em geral, tende a aumentar ligeiramente com o aumento da quantidade de cimento adicionado, devido ao aparecimento dos produtos das reações. Pode ver-se esse ligeiro aumento na figura 3.3. As reações de hidratação e pozolânicas reduzem então o teor em água e conduzem a produtos cimentícios sólidos, que eventualmente são os responsáveis pelo aumento do peso volúmico, ou seja, o volume de vazios no solo reduz-se, pois parte do volume de água é substituído por esses produtos. Deve também referir-se que, após a cura, o aumento do peso volúmico do solo tratado não se deve só às quantidades de cimento, mas também a outros fatores como, por exemplo, a homogeneidade da mistura, presença de bolhas de ar e condições de cura.



**Figura 3.3 - Variação do peso volúmico das três argilas finlandesas misturadas com várias quantidades de cimento aos 7 e 28 dias de cura (adaptado de Hassan, 2009)**

A acidez da mistura é também relevante, pois, como já foi dito, um pH alto ( $> 12$ ) favorece as reações iniciais e a longo prazo, as pozolânicas. Al-Zoubi (2008) estudou as características de um solo de Al-Marj, na Jordânia, misturado com várias quantidades de cimento Portland, não especificando a composição e classe de resistência. O solo era uma argila inorgânica de elevada plasticidade ( $w_L=53\%$ ;  $IP=26\%$  e  $pH=7,8-9$ ). Na figura 3.4 verifica-se que o pH inicial do solo aumentou significativamente com teores relativamente baixos de cimento, atingindo o valor de 11,4 com 6% de cimento, a partir do qual os valores se tornaram aproximadamente constantes. O aumento de pH deve-se à natureza alcalina das reações ( $Ca(OH)_2$ ), ou seja, o cimento é responsável pela neutralização do material.

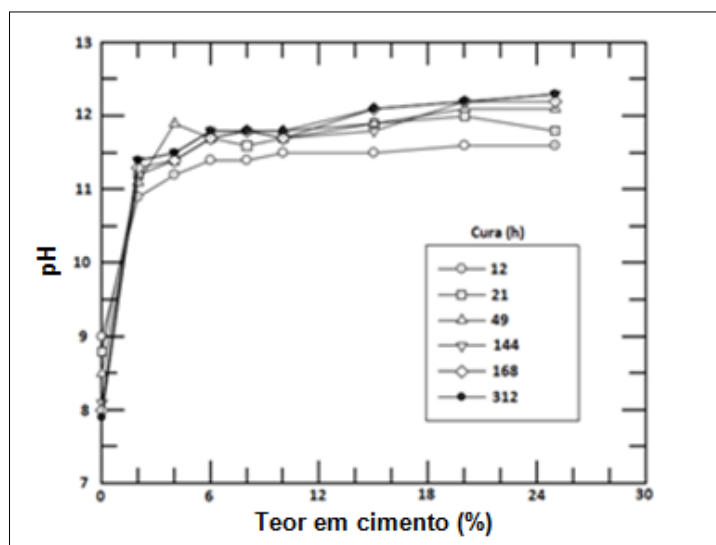
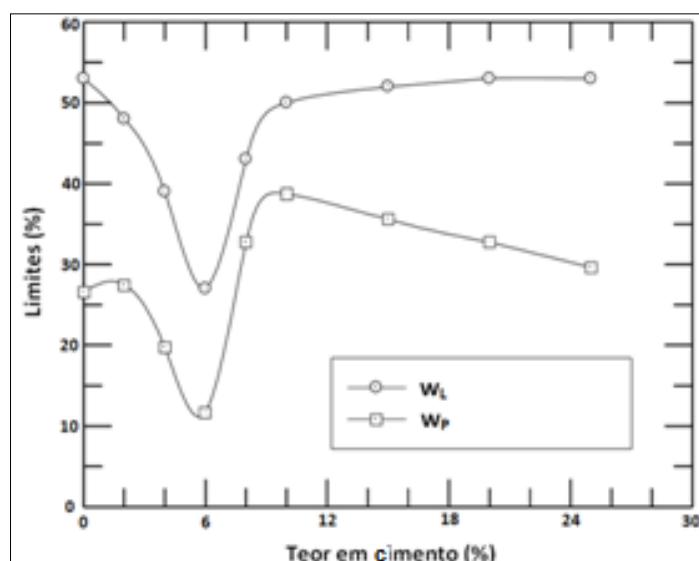


Figura 3.4 - Efeito do teor em cimento e tempo de cura no pH de um solo de Al-Marj, Jordânia (adaptado Al-Zoubi, 2008)

Este aspeto sobre o pH acaba também por ser importante nas aplicações do solo-cimento em contenções de escavações com solução de colunas armadas com perfis metálicos, uma vez que, estes últimos, poderão ficar sujeitos a efeitos de corrosão.

Ainda relativamente aos resultados de Al-Zoubi (2008), na figura 3.5, apresentam-se as alterações no limite de liquidez e plasticidade da mesma argila. Através da figura, entende-se que o limite de liquidez diminuiu drasticamente no intervalo de 0 a 6% de teor de cimento, enquanto, no intervalo de 6 a 10% aumentou nas mesmas proporções. Após esse aumento, o limite de liquidez aumentou lentamente e tornou-se praticamente constante nos teores de cimento mais altos. O limite de plasticidade, até aos 10% de cimento, seguiu uma tendência semelhante ao limite de liquidez. No entanto, diminuiu de forma constante a partir desse valor de cimento. A diminuição inicial dos limites (capacidade de retenção de água) é atribuída à troca de cátions entre o solo e o cimento e à mínima atividade pozolânica, provada pelo pH inicial (Al-Zoubi, 2008). O aumento do limite de liquidez para teores de cimento superiores a 6% deve-se ao aumento das reações pozolânicas aquando do aparecimento de grandes quantidades de  $Ca(OH)_2$ , resultado das reações de hidratação, indicado pelo aumento de pH para valores superiores a 6% de cimento. Em suma, as reações pozolânicas são

responsáveis pelo aumento da capacidade de retenção de água do solo e, desta forma, pelo aumento dos limites de liquidez e plasticidade.

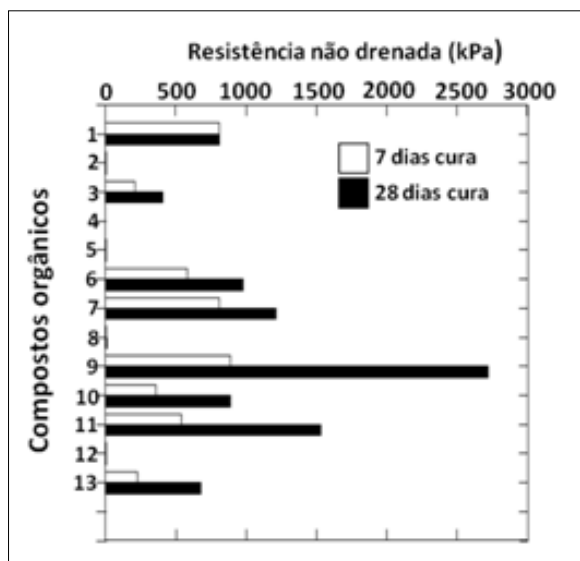


**Figura 3.5 – Efeito do teor em cimento nos limites de liquidez e plasticidade de um solo de Al-Marj, Jordânia (adaptado Al-Zoubi, 2008)**

Relativamente à matéria orgânica, esta consiste geralmente em ácidos húmicos resultantes da decomposição de animais e plantas. A presença destes ácidos, como já foi dito, pode influenciar fortemente o melhoramento do solo, logo, o comportamento mecânico do solo-cimento. A matéria orgânica causa uma retenção de água importante, interferindo com as reações de hidratação do cimento, e além disso, altera a superfície específica das partículas do solo, dificultando a ligação do cimento a essas partículas. Estes ácidos húmicos reagem ainda com os óxidos de cálcio, produzindo precipitados insolúveis que provocam uma diminuição do pH, inibindo as reações pozolânicas responsáveis pela cimentação do material (Axelsson *et al*, 2002).

Devido a estas interferências importantes, torna-se necessário estudar este fator, os seus teores no solo e as suas relações com o cimento a usar na mistura. Foi o que fizeram Tremblay *et al* (2002). Estes autores estudaram a influência de vários tipos de matéria orgânica, adicionando 10% de cada um individualmente a uma argila de St-Alban, Canadá ( $w_L = 44\%$ ;  $w_P = 18\%$ ;  $mo = 1\%$ ), misturando-a com 10 % de cimento Portland, não especificando a composição e a classe de resistência.

Os resultados são apresentados na figura 3.6, observando-se que só alguns compostos afetaram negativamente o desenvolvimento da resistência. São eles os ácidos acético, húmico, EDTA e a sacarose que, segundo dados dos autores, só atingiu os 15 kPa de resistência em comparação com os 800 kPa do solo inorgânico. Nalguns casos, observou-se um aumento da resistência do material. Este episódio acontece na presença de, por exemplo, querosena ou xileno+tolueno e é explicado pelo facto de estes compostos aumentarem o pH. Como foi dito anteriormente, o pH influencia o sucesso das reações pozolânicas, sendo que estas reações se dão em pH mais alcalino.



1-solo inorgânico; 2-ácido acético; 3-ácido benzoico; 4-ácido húmico; 5-ácido tânico; 6-celulose; 7-amido; 8-sacarose; 9-querosena; 10-óleo vegetal; 11-xileno+tolueno; 12-ácido EDTA; 13-etilenoglicol

**Figura 3.6 - Resistência não drenada de uma argila de St-Alban misturada com 10% de vários compostos orgânicos e com 10% de cimento Portland (adaptado de Tremblay *et al* 2002)**

### 3.3.2 Resistência e deformabilidade

A resistência do solo-cimento pode ser estudada efetuando ensaios de resistência à compressão uniaxial, ensaios de tração, ensaios de corte ou até mesmo ensaios de flexão, entre outros, sendo que os resultados podem ser usados para o projeto e para o controlo de qualidade.

Na figura 3.7 apresenta-se um exemplo de um ensaio de compressão uniaxial sobre amostras de solo-cimento com 7 dias de cura, publicado num estudo feito por Muhunthan e Sariosseiri (2008) a um silte ML de Aberdeen, EUA ( $w_L = 54,2\%$ ;  $w_P = 42,8\%$ ;  $\gamma_d = 14,3 \text{ kN/m}^3$ ) misturado com vários teores de cimento Portland, não definindo a composição do cimento, nem a sua classe de resistência. Na figura observa-se que o pico de rotura aumentou significativamente com o aumento do teor em cimento e a deformação axial correspondente diminuiu aproximadamente de 4% para 1%. Este facto pode ser explicado pelo aparecimento de produtos das reações de hidratação e pozolânicas do cimento.

Por outro lado, é de referir que, o tempo de cura tem também uma influência importante na resistência, pois ao longo do tempo vão-se formando os produtos cimentícios resultantes das reações pozolânicas. Como exemplo tem-se, entre outros, os resultados dos ensaios de compressão uniaxial feitos por Correia (2011) a solo-cimento constituído por um silte ( $w_{nat} = 80,87\%$ ;  $w_L = 71,03\%$ ;  $IP = 28,23 \%$ ) e cimento Portland do tipo CEM I-42,5R, apresentados na figura 3.8.

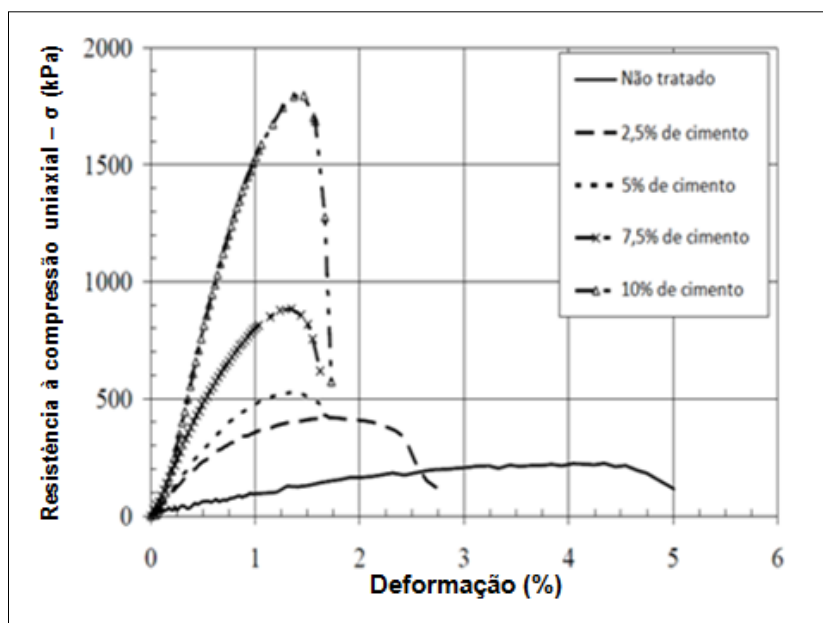


Figura 3.7 - Efeito da % de cimento no comportamento tensão-deformação de um solo de Aberdeen (adaptado de Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

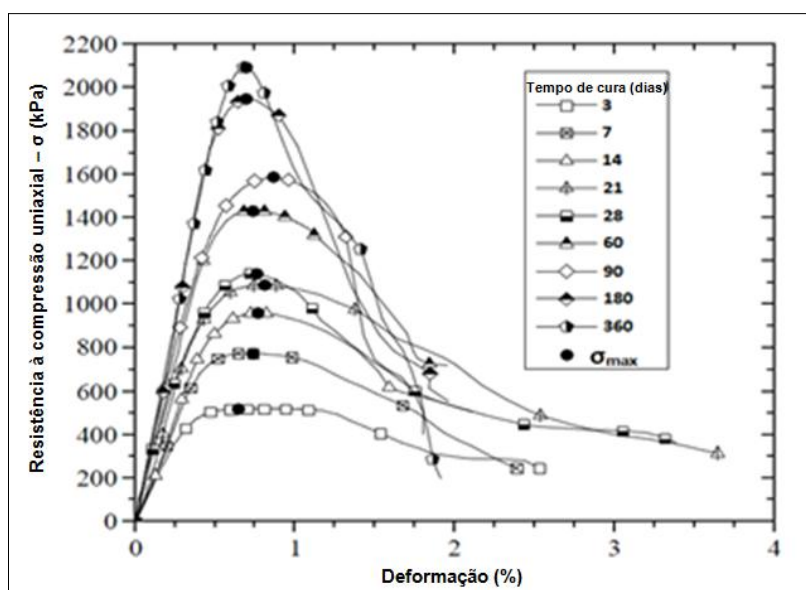


Figura 3.8 – Alteração das curvas de tensão-deformação do ensaio de resistência à compressão uniaxial num solo-cimento por variação do tempo de cura (Correia, 2011)

Assim como o ensaio de compressão uniaxial, o ensaio de tração revela também o ganho de resistência do solo-cimento. Esse ganho pode observar-se na figura 3.9, que retrata o resultado de ensaios de tração brasileiro em provetes cilíndricos de 50mm por 50mm, de uma argila de Singapura ( $w_L = 88\%$ ;  $w_P = 38\%$ ;  $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ ) misturada com vários teores de cimento Portland realizados por Huawen (2009). O autor não especifica a composição e classe de resistência do cimento usado para a criação dos provetes. Pode constatar-se que a resistência à tração aumentou com o teor em cimento e foi maior com o aumento do tempo de cura. Mais uma vez, esta situação justifica-se com a produção do material cimentício resultante das reações pozolânicas que se dão ao longo do tempo.

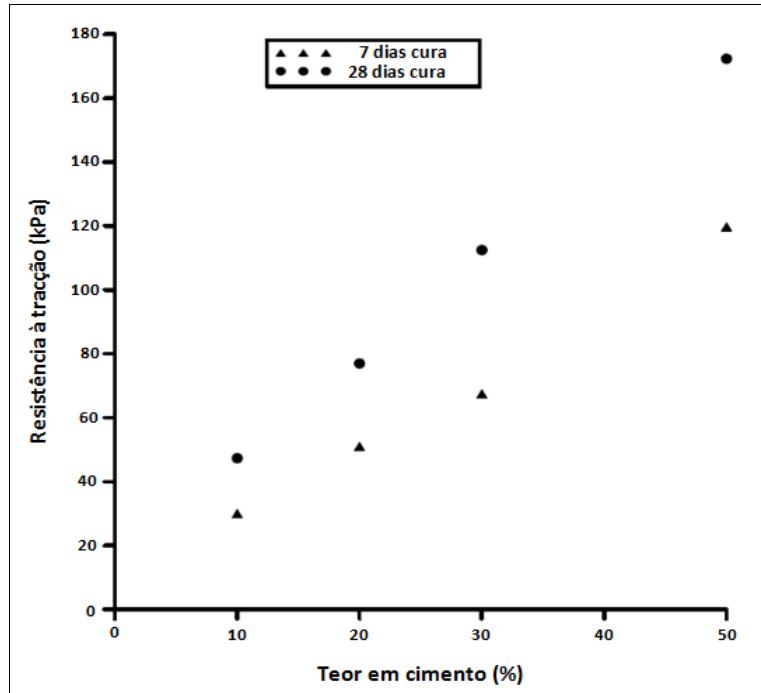


Figura 3.9 – Resistência à tração de uma argila de Singapura em função do teor em cimento (Huawen, 2009)

Relativamente ao ensaio de flexão, tem-se, como exemplo, o trabalho realizado por Siddique e Rajbongshi (2002) em provetes de solo-cimento produzidos com um silte de baixa compressibilidade de Chittagong, Bangladesh, ( $w_L=30\%$ ;  $w_p=23\%$ ;  $IP=7\%$ ) e com vários teores de cimento Portland, não especificando as suas características. As dimensões dos provetes eram 76,2mm por 76,2mm por 285,8 mm. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.10 e figura 3.11 em função da resistência à flexão ( $R_f$ ) e módulo de flexão ( $E_f$ ), definidos como:

$$R_f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.8)$$

$$E_f = \frac{23PL^3}{1296I\Delta} \quad (3.9)$$

onde,

$P$  = carga total aplicada

$L$  = comprimento do provete

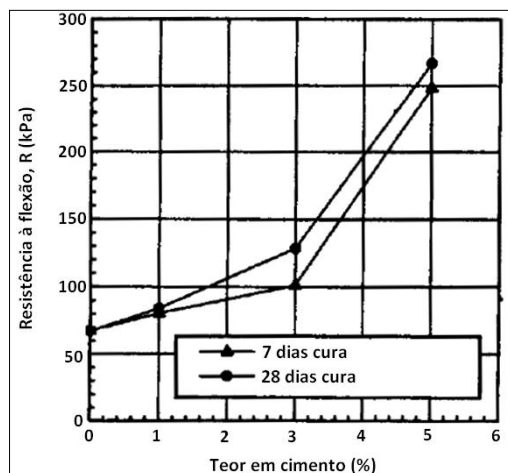
$b$  = largura média

$d$  = altura média

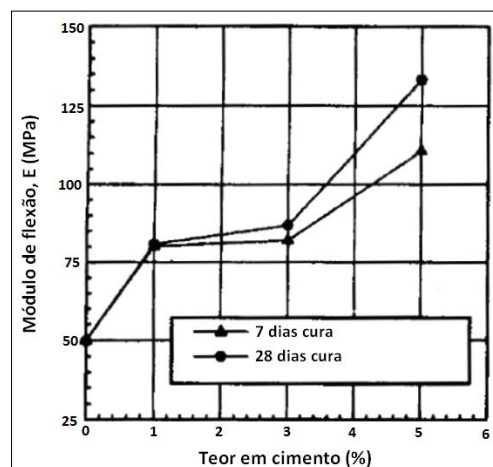
$I$  = momento de inércia da secção

$\Delta$  = deflexão no meio do provete

Em comparação com os resultados das amostras de solo sem cimento, a resistência à flexão  $R_f$  e o módulo de flexão  $E_f$  do solo-cimento aumentaram significativamente com o teor em cimento e o tempo de cura. Por exemplo, o solo-cimento com 5% de teor em cimento e com 28 dias de cura apresentou valores de resistência à flexão e módulo de flexão cerca de, respetivamente, 4 e 2,5 vezes superiores ao solo não tratado. Repetindo a justificação, tal acontece devido ao aparecimento de produtos cimentícios, resultantes das reações pozolânicas.



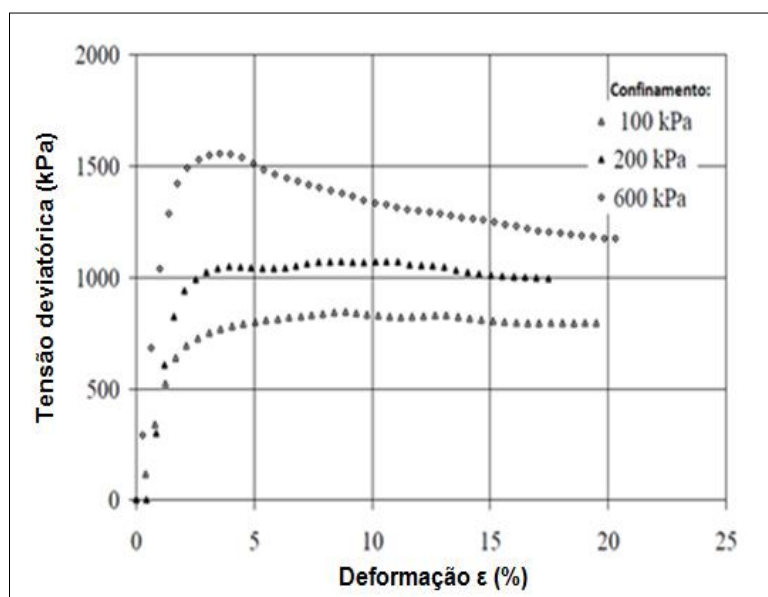
**Figura 3.10 - Efeito da % de cimento e do tempo de cura na resistência à flexão (adaptado de Siddique e Rajbongshi, 2002)**



**Figura 3.11 – Efeito do teor em cimento e do tempo de cura no módulo de flexão (adaptado de Siddique e Rajbongshi, 2002)**

O ensaio de corte triaxial consiste em aplicar tensões verticais (axiais) e horizontais (radiais) em provetes cilíndricos protegidos com uma membrana no interior de uma câmara com água, que aplica a tensão de confinamento ao provete. As tensões horizontais são aplicadas através da sobreposição das tensões de confinamento e as tensões verticais resultam do somatório entre a carga de confinamento e a carga aplicada por um pistão. Esta última é chamada de tensão deviatórica. Este ensaio permite simular as condições do estado de confinamento do material intacto no campo.

Nas figura 3.12 e figura 3.13 apresentam-se resultados de um ensaio triaxial consolidado não drenado (CU) realizado por Muhunthan e Sariosseiri (2008) a um solo SP-SM de Everett, EUA ( $w_L = 32,5\%$ ;  $w_P = 29,3\%$ ;  $\gamma_d = 18,7 \text{ kN/m}^3$ ) misturado com cimento Portland, sendo que os autores não especificaram as características do cimento Portland utilizado. Na figura 3.12 pode ver-se que, para um teor em cimento de 5%, e para tensões de confinamento baixas (100-200 kPa), as curvas não apresentam um pico. Com o aumento da tensão de confinamento começa a existir uma tensão de pico e o material sofre um certo amolecimento existindo uma tensão residual inferior ao referido valor de pico. Assinala-se ainda que o material tem um comportamento próximo do elástico linear para pequenas deformações, inferiores a 2%.



**Figura 3.12 – Resultado do ensaio triaxial CU para um solo de Everett, EUA tratado com 5% de cimento (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)**

Através da figura 3.13 comprova-se que, com o aumento dos teores de cimento, o solo-cimento apresenta um aumento significativo no valor de tensões deviatóricas que consegue suportar. Essas tensões praticamente triplicaram com teores de 5% de cimento e chegaram a aumentar mais de 10 vezes com teores de 10% de cimento, face ao solo não tratado. Este tipo de comportamento dá-se devido ao aumento de resistência que o material beneficiou com a ajuda das ligações cimentícias entre as partículas do solo e os produtos resultantes das reações do cimento.



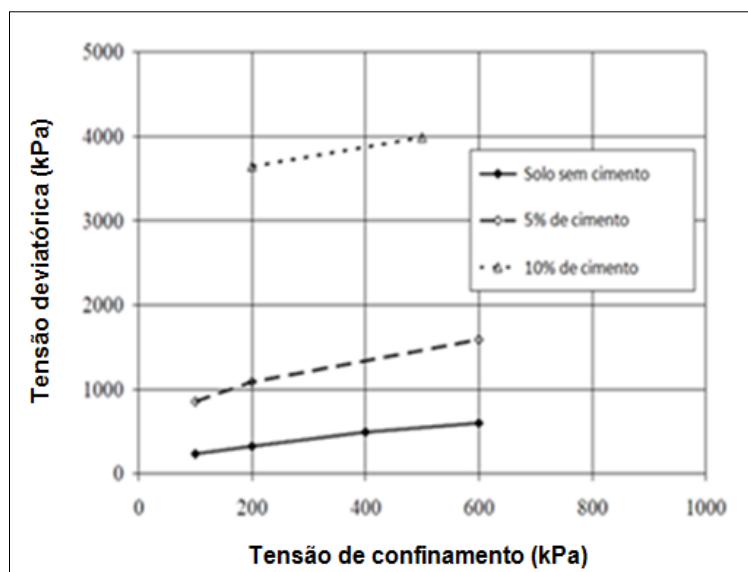


Figura 3.13 – Variação da tensão deviatória máxima para um solo de Everett, EUA com diferentes teores de cimento (adaptado de Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

A deformabilidade de misturas de solo-cimento pode ser obtida em ensaios triaxiais ou de compressão simples, através das curvas tensão-deformação. O módulo de deformabilidade ( $E$ ) entende-se como sendo a relação entre a tensão e a deformação do material. Os valores deste módulo podem variar entre 50 a 200 vezes o valor da resistência à compressão uniaxial (FHWA, 1998 in Andromalos *et al*, 2000), em que os valores mais altos tendem a ser obtidos para solos incoerentes e os mais baixos, para solos coesivos. Um exemplo é o estudo feito por Lorenzo e Bergrado (2004), que analisaram várias propriedades de solo-cimento criado com uma argila de Bangucoque, Tailândia ( $w_L = 103\%$ ;  $w_P = 43\%$ ;  $\gamma = 14,3 \text{ kN/m}^3$ ) com cimento Portland do tipo CEM I e obtiveram módulos de deformabilidade secantes na ordem das 115 a 150 vezes o valor da resistência à compressão uniaxial.

Outro exemplo é o já referido de Hassan (2009) que estudou um solo-cimento com três argilas da Finlândia (tabela 3.3), misturadas com vários teores de cimento Portland CEM II-42,5N. Para estes materiais, o autor obteve uma média de módulos de deformabilidade secantes na ordem dos 139, 189 e 123 vezes o valor da resistência à compressão para cada uma das argilas analisadas.

### 3.3.3 Permeabilidade

A permeabilidade, ou condutividade hidráulica, é, naturalmente uma propriedade bastante importante quando se analisa a aplicação de um dado material na contenção de escavações.

Chew *et al* (2004) estudaram esta propriedade numa argila marinha de Singapura ( $\gamma = 15,92 \text{ kN/m}^3$ ;  $w_L = 87\%$ ;  $w_P = 35\%$ ) misturada com vários teores de cimento Portland do tipo CEM I, fazendo uma mistura prévia do solo com água que conduziu a um teor em água de 120%. Os ensaios foram efetuados com auxílio de uma célula edométrica modificada (embora o autor não explicita a

modificação introduzida) e a permeabilidade foi medida no fim da consolidação primária para cada incremento de carga. Os resultados podem ser observados na figura 3.14.

Verifica-se então que, para uma mesma tensão vertical efectiva, o solo inicial apresentou uma menor permeabilidade que o solo misturado com cimento, significando que, para uma mesma profundidade, o solo misturado com cimento terá um maior índice de vazios que o solo inicial, facto que se pode observar na figura 3.15.

Relativamente ao tempo de cura, o aumento da permeabilidade a curto prazo pode ser explicado pela adição de iões  $\text{Ca}^{+2}$ , aumentando a valência e concentração de iões no solo, provocando flocculação de partículas de argila. A longo prazo, a permeabilidade diminui sempre, em função do aparecimento dos produtos cimentícios, diminuindo o índice de vazios. Aos 7 dias de cura, a permeabilidade é muito mais sensível à tensão vertical efectiva do que aos 28 dias, significando que a estrutura do solo-cimento aos 7 dias de cura é menos resistente a carregamentos compressivos. Como ao longo do tempo se vão formando os produtos cimentícios das reacções pozolânicas, estes preenchem alguns vazios existentes, ligando as partículas do solo, tornando a estrutura mais resistente e menos compressível.

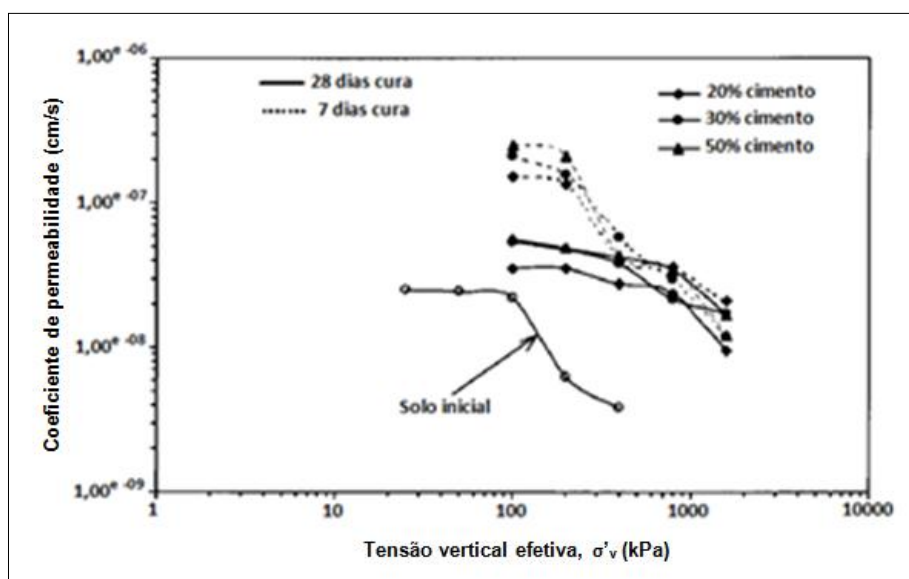


Figura 3.14 – Efeito do teor em cimento e tempo de cura na permeabilidade de uma argila de Singapura (adaptado de Chew *et al*, 2004)

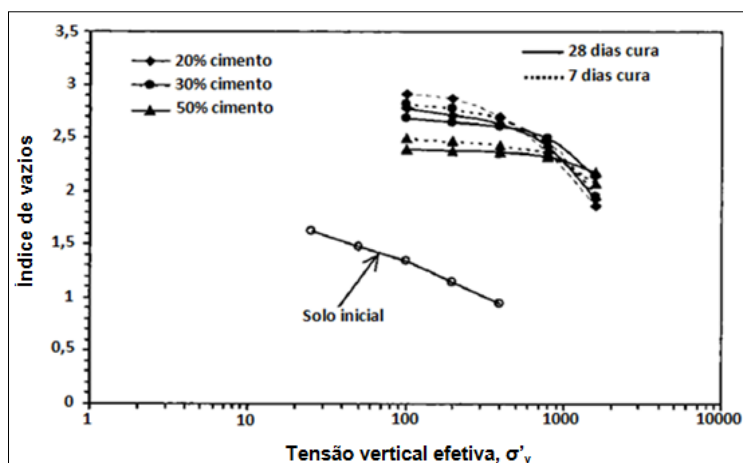


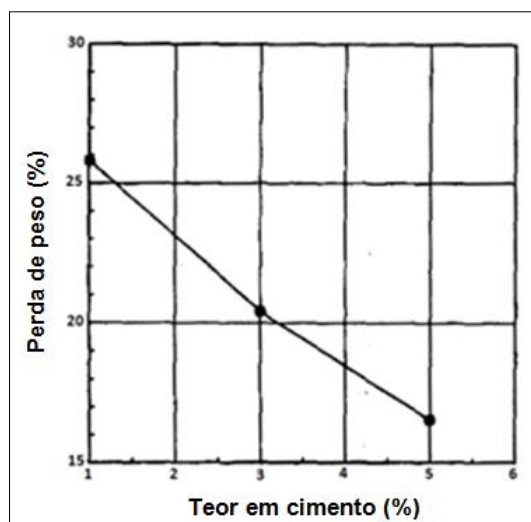
Figura 3.15 - Efeito do teor em cimento e tempo de cura no índice de vazios de uma argila de Singapura (adaptado de Chew *et al*, 2004)

### 3.3.4 Durabilidade

Para saber se o material vai manter as suas características em condições aceitáveis ao longo do tempo, quando sujeito a fatores como humidade e variações de temperatura, fazem-se ensaios de durabilidade. Os ensaios consistem em submeter provetes a vários ciclos de molhagem-secagem ou gelo-degelo, escová-los e medir a sua perda de peso. O ensaio de gelo-degelo será naturalmente mais relevante para regiões onde é habitual haver grandes amplitudes térmicas envolvendo baixas temperaturas. Neste ensaio, um ciclo corresponde a mergulhar um provete em água e colocar o conjunto a temperatura baixa durante 24 horas. Após essas 24 horas, é retirado do frio e colocado em ambiente húmido.

No ensaio de molhagem-secagem, um ciclo corresponde em mergulhar um provete com 7 dias de cura em água à temperatura ambiente por 5 horas. Após esse tempo, o provete é transferido para uma estufa a 71°C onde fica durante 42 horas. Depois das 42 horas o provete é colocado à temperatura ambiente para arrefecimento durante uma hora (E263, 1972).

Como exemplo deste tipo de estudo tem-se aquele apresentado por Siddique e Rajbongshi (2002). Neste caso, os ensaios de durabilidade realizados foram do tipo molhagem-secagem sobre um silte de Chittagong, Bangladesh, ( $w_L=30\%$ ;  $w_p=23\%$ ;  $IP=7\%$ ) misturado com vários teores de cimento Portland, em que os autores não especificam as suas características. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.16. Assinala-se então que a perda de peso dos provetes de solo-cimento diminui com o aumento do teor em cimento, devido a uma maior consistência do material.



**Figura 3.16 – Efeito do teor em cimento na perda de peso cumulativo por ciclos de molhagem-secagem (adaptado de Siddique e Rajbongshi, 2002)**

Outro tipo de resultado que se pode apresentar nestes ensaios é a relação entre a resistência à compressão uniaxial dos provetes antes dos ensaios de durabilidade e após os mesmos. Como exemplo, refere-se os resultados de Cruz (2004), que obteve um índice de durabilidade (ID) baseando-se nesta relação para uma areia argilosa ( $w_L=36,0\%$ ;  $w_p=18,8\%$ ;  $IP=17,2\%$ ) misturada com cimento Portland. A autora não definiu tipo e composição do cimento utilizado. Na tabela 3.4 apresentam-se os resultados obtidos, sendo o índice de durabilidade (ID) de zero correspondente à desintegração dos provetes após o ensaio molhagem secagem. Relativamente aos resultados das misturas solo-cimento, eles conduziram a valores bastante semelhantes, embora os provetes que contêm mais cimento são, obviamente os que apresentam maiores resistências.

**Tabela 3.4 - Relação dos resultados dos ensaios de molhagem-secagem com as resistências (adaptado de Cruz, 2004)**

	Resistência sem ciclos – $R_s$ (MPa)	Resistência com ciclos – $R_c$ (MPa)	$ID = R_c/R_s \times 100$
<b>Solo inicial</b>	1,7	0,0	0,0
<b>6% de cimento</b>	14,6	13,6	93,2
<b>10% de cimento</b>	19,7	18,4	93,4

## 4 Contenções de escavações

### 4.1 Tipos de contenções convencionais

Uma escavação pode ser feita sem qualquer tipo de contenção, desde que haja espaço para realizar um talude estável, sendo a inclinação definida de acordo com as características do terreno em questão. Quando a execução deste talude se torna inviável, realizam-se então contenções dos terrenos, podendo recorrer-se a diversos tipos de sistemas. Os sistemas mais usuais são descritos nos próximos parágrafos.

Existem variadíssimos tipos de contenções, diferenciando-se nos elementos constituintes, nos materiais, nos processos construtivos e na finalidade com que são executados: suporte de terras, proteção de estruturas adjacentes às mesmas, controlo de levantamento hidráulico do fundo da escavação e prevenção de deslizamentos de terrenos (LNEC, 1984). As cortinas, de espessura relativamente reduzida, são feitas em aço, betão armado ou madeira, e são apoiadas por ancoragens, escoras ou impulsos passivos do terreno (Martins e Aguiar, 2005). De seguida, apresentam-se os sistemas de contenção de escavações mais comuns.

#### 4.1.1 Paredes moldadas

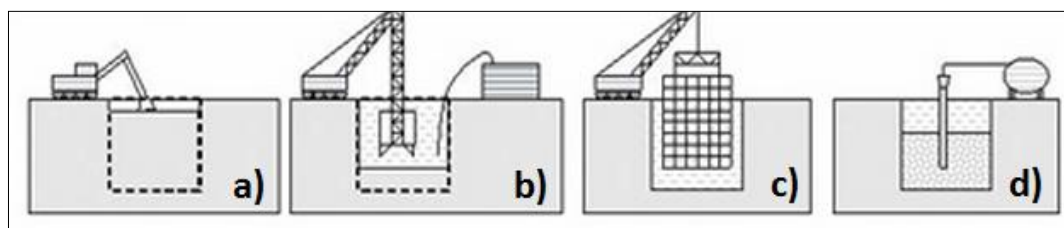
Segundo Coelho (1996), a parede moldada no solo é uma cortina executada no solo, em grandes painéis sucessivos, betonados em trincheira escavada mecanicamente. O processo construtivo desta parede contém um elemento muito próprio: trata-se da lama de estabilização da escavação. Composta por água, bentonite ou polímeros e eventualmente outros aditivos, a lama deve ser adaptada para estabilizar a trincheira durante a escavação até ao fim da betonagem, exercendo uma pressão nas paredes da escavação, suportando-as. Este tipo de cortina é um elemento resistente de contenção periférica que pode ser elemento de fundação. Descreve-se então, resumidamente, a sua execução (figura 4.1 e figura 4.2): é feita uma escavação prévia seguida de execução de muretes-guia em betão armado (figura 4.2a). Faz-se a escavação dos painéis da parede moldada com um “grab” e/ou trépano e seguidamente introduz-se a lama estabilizadora (figura 4.1a e 4.1b e figura 4.2b). No passo seguinte, coloca-se a armadura (figura 4.1c e figura 4.2c) que foi fabricada de acordo com as dimensões de cada painel e, por fim, faz-se a betonagem ou enchimento da parede moldada (figura 4.2d).

Cada painel individual, em geral, não tem capacidade de transmitir esforços de corte, sendo então prática comum, executar uma viga de distribuição em betão armado no coroamento da parede (Coelho, 1996).



a) escavação com o “grab”; b) introdução da lama; c) colocação da armadura; d) parede moldada finalizada

**Figura 4.1 – Algumas fases do processo construtivo de uma parede moldada (adaptado de Varatojo, 2005)**



a) Muretes-guia; b) Escavação da vala e adição da lama; c) Colocação de armaduras; d) betonagem

**Figura 4.2 – Esquema do processo construtivo geral de paredes moldadas (adaptado de Construironline, 2012)**

#### 4.1.2 Contenções tipo Berlim

Esta contenção consiste na introdução de perfis metálicos no terreno, normalmente em forma de I ou de H, espaçados, sendo depois encaixados entre eles pranchas que podem ser de madeira (figura 4.3), metálicas, (para uma contenção temporária), ou de betão armado (para uma contenção definitiva). A cortina vai sendo executada à medida que a escavação avança (figura 4.4). É indicada para ambiente urbano, quando se pretende uma contenção provisória de rápida execução e económica, não necessitando de cofragens. Esta solução requer terrenos com alguma consistência e sem presença significativa de água. Dada a flexibilidade deste tipo de contenções, deve ser dada particular atenção às deformações que serão produzidas no solo envolvente e, nomeadamente, aos seus efeitos em estruturas vizinhas (Chang, 2006). Relativamente ao processo de construção para



uma contenção definitiva (em betão armado), este pode ser descrito da seguinte forma (Patrício e Teixeira, 2006):

- escavação geral onde se prepara superficialmente o terreno, regularizando-o;
- introdução dos perfis metálicos em furos pré escavados com um trado;
- selagem com argamassa em profundidade abaixo da cota de fundo de escavação e preenchimento com areia no restante;
- escavação em frentes alternadas para execução do primeiro nível de painéis primários, deixando banquetas nas zonas correspondentes aos painéis secundários;
- execução dos painéis primários: montagem da armadura e betonagem;
- execução de escoramentos (se as fronteiras forem suficientemente próximas) ou ancoragens nos painéis executados na fase anterior;
- remoção das banquetas correspondentes aos painéis secundários e respetiva execução;
- uma vez garantida a estabilidade dos painéis primários e secundários, a escavação do primeiro nível está concluída;
- repetição das fases anteriores para cada um dos níveis de escavação previstos até à cota do fundo da escavação.

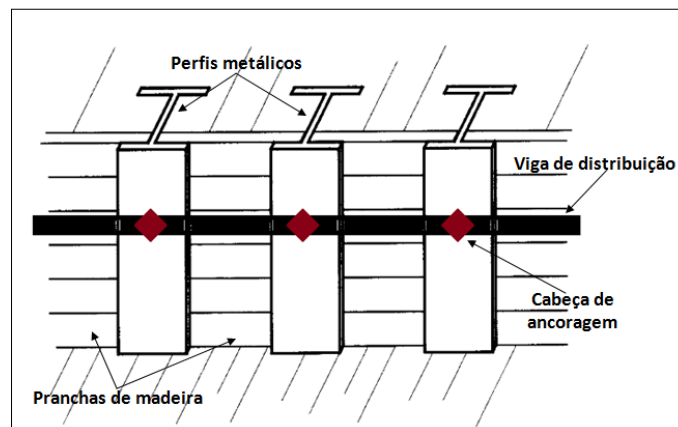


Figura 4.3 – Esquema de uma contenção Berlim provisória (adaptado de Chang, 2006)



Figura 4.4 – Execução de contenções Berlim provisórias (adaptado de Varatojo, 2005)

### 4.1.3 Cortinas de estacas-prancha

São cortinas executadas com perfis laminares metálicos cravados no terreno. Os perfis são geralmente metálicos, mas também podem ser de madeira ou até de betão (figura 4.5). São indicadas para solos brandos ou para intercepar a percolação de água ou conter água e solo em escavações (figura 4.6).

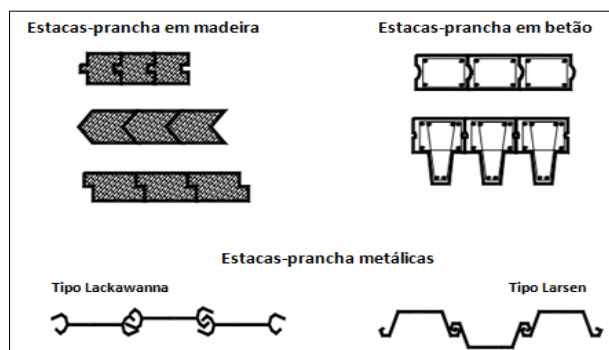


Figura 4.5 – Esquema de perfis de estacas-prancha (adaptado de Martins e Aguiar, 2005)



a) Ensecadeira; b) Cortina de contenção de terras

Figura 4.6 – Exemplos de aplicações de estacas-prancha (adaptado de Sheetpilespiling, 2012 e de Varatojo, 2005)

Em terra, existem essencialmente três métodos de execução esquematizados na figura 4.7 (Coelho, 1996):

1. Mais indicado para terrenos aluvionares, a estaca-prancha é guiada lateralmente durante a cravação pela junta da estaca prancha precedente, sendo a cravação feita de uma só vez. Exige-se muita atenção à verticalidade das estacas.
2. Não sendo muito diferente do primeiro, também é indicado para solos aluvionares. A cravação é feita guiando a estaca-prancha desde o início por contraventamento a dois níveis e pela junta acima do solo da estaca-prancha precedente. A cravação faz-se de uma só vez, até ao nível superior do contraventamento, sendo este nível desmontado para prosseguir a cravação em segunda fase.



3. Consiste na cravação por painéis (6 a 10 pares de estacas), utilizando contraventamentos a dois níveis e é feita em degraus. A cravação é executada por etapas.

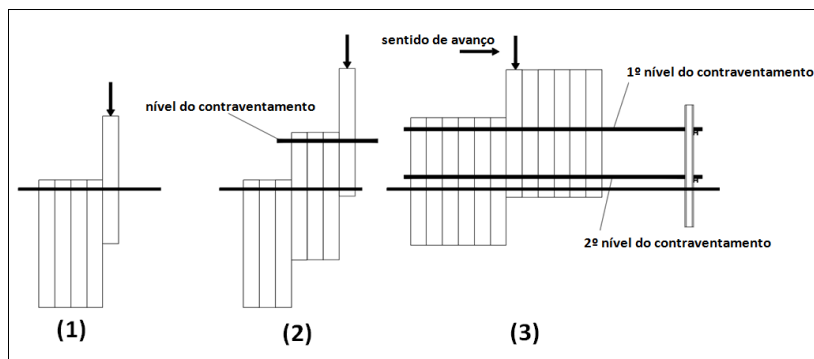


Figura 4.7 – Métodos de construção de cortinas de estacas-prancha (adaptado de Coelho, 1996)

Em zonas submersas, segundo Coelho (1996), as estacas poderão ser cravadas de uma só vez, mas aconselha-se a cravação em várias etapas até ao nível do contraventamento. O avanço deve ser feito no sentido contrário ao da corrente, para evitar a inclinação da estaca no plano da cortina.

#### 4.1.4 Cortinas de estacas de betão

Os elementos estruturais desta solução são as estacas, as quais podem ser espaçadas, tangentes ou secantes. De acordo com a NP EN 1997 (2010) as estacas podem ser classificadas como cravadas, instaladas com extração do terreno e instaladas com trado contínuo:

- as estacas cravadas, executadas sem extração do terreno, são pré-fabricadas. Elas são transportadas para o estaleiro da obra, onde são inseridas no terreno, em regra geral através de sistemas percussivos de impacto e/ou com ações de vibração simultâneas;
- as estacas instaladas com extração do terreno podem ser executadas com tubo moldador (eventualmente recuperável) ou com recurso a lamas. No primeiro caso o tubo moldador é em regra cilíndrico e metálico e vai funcionar como sustentação das paredes do furo antes da betonagem. Este tubo é cravado e procede-se à remoção do solo no seu interior. Após esta fase, coloca-se a armadura e faz-se a betonagem no sentido ascendente. À medida que a betonagem é feita, o tubo moldador é puxado para cima e recuperado. A solução com recurso a lamas é utilizada em solos sem capacidade de auto-sustentação em que as lamas têm a mesma função do tubo moldador anterior. Fura-se o terreno com um trado suspenso e limpa-se o furo ao mesmo tempo que este é preenchido com as lamas, para estabilizar as paredes. Introduce-se a armadura e faz-se a betonagem do furo no sentido ascendente. As lamas são extraídas e recicladas para aplicação na execução de outras estacas;

- nas estacas instaladas com trado contínuo o furo é feito por rotação de um trado contínuo em hélice ao longo de um eixo oco e através deste é realizada a betonagem. Após este processo, introduz-se uma armadura metálica;

Na figura 4.8 encontram-se dois exemplos de cortinas de estacas.



Figura 4.8 – Exemplos de cortinas de estacas de betão (adaptado de FHWA, 2012)

#### 4.1.5 Vantagens e limitações das soluções de contenção de escavações mais comuns

Os tipos de soluções atrás abordados são atualmente muito utilizados em Portugal. De seguida apresentam-se as suas vantagens e limitações (tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Vantagens e limitações dos sistemas de contenções mais comuns (adaptado Rutherford *et al*, 2005)

Sistema de Contenção	Vantagens	Limitações
<b>Paredes moldadas</b>	Construídas antes da escavação, podendo ser instaladas abaixo do nível freático. Podem ser usadas para contenções definitivas e na maioria dos tipos de solo existentes. Rigidez elevada. Se o equipamento consistir num trépano, este pode penetrar elementos de granulometria muito grosseira.	Grande volume de excedentes de calda. Método oneroso relativamente aos outros tipos de contenção. Dificil execução em terrenos inclinados.
<b>Contenções Berlim</b>	Custo inicial baixo. Processo fácil de manobrar e construir.	Não aplicável em solos incoerentes ou com nível freático presente. Limitações de profundidade. O processo de construção leva a grande descompressão do terreno, levando a assentamentos de eventuais estruturas adjacentes.
<b>Estacas-prancha</b>	Construídas antes da escavação, podem ser instaladas abaixo do nível freático, pois são impermeáveis. Custo inicial baixo. Fáceis de manobrar e construir.	Não aplicáveis em solos com presença de blocos. O processo de instalação provoca vibrações e ruídos. Possíveis problemas com as juntas. Limitações na profundidade. Pode sofrer movimentos laterais, rigidez limitada.
<b>Cortina de estacas de betão</b>	Construídas antes da escavação e podem ser instaladas abaixo do nível freático. Baixas vibrações e ruído no processo de instalação. Podem ser reforçadas com perfis metálicos em I ou H.	Dependendo do equipamento a utilizar, pode haver problemas em ultrapassar níveis com elementos de granulometria muito grosseira podendo ser necessário efetuar pré-furação. Continuidade da cortina pode ser comprometida no processo de instalação.

## **4.2 Contenções utilizando a técnica *Deep Soil Mixing***

### **4.2.1 A escolha do método DSM para contenção de escavações**

Locais em que o terreno é constituído por solos de elevada deformabilidade, sensíveis a vibrações e com presença de níveis freáticos elevados, são, em geral, adequados para a execução de uma contenção com a técnica DSM. A terminologia conhecida para a aplicação desta técnica à contenção de escavações é conhecida como *Soil Mixed Wall* (SMW). Como a implementação de contenções de solo-cimento, desde que haja um bom controlo executivo, provoca perturbações mínimas na envolvente, esta técnica pode ser utilizada em locais próximos de estruturas como edifícios.

Por outro lado, tendo em conta que o equipamento vai penetrar o terreno antes mesmo da escavação ser feita, a presença de estruturas subterrâneas pode não inviabilizar o recurso a uma solução de contenção baseada no DSM.

Em zonas dominadas pela presença de solos muito rígidos, a aplicação da técnica de DSM a contenções pode obrigar a uma pré-furação para se garantir a homogeneidade, logo, tornando a solução mais onerosa.

A viabilidade aplicativa da técnica DSM para contenção de escavações vai sempre depender das condições do terreno local, já que, por exemplo, devido ao grande porte do equipamento, será sempre necessário uma boa área de trabalho.

As considerações económicas que determinam o DSM como possibilidade aplicativa também estão relacionadas com fatores como a disponibilidade de equipamento, materiais e pessoal especializado (Rutherford *et al*, 2005).

O sucesso da técnica construtiva vai depender muito da qualidade de trabalho e a experiência do empreiteiro. Fatores como o tipo de equipamento escolhido, a operação de instalação das colunas e o controlo de qualidade são bastante relevantes para a qualidade do resultado final. A operação está dividida em duas categorias principais (figura 4.9): produção da calda e o controlo de todo o equipamento.

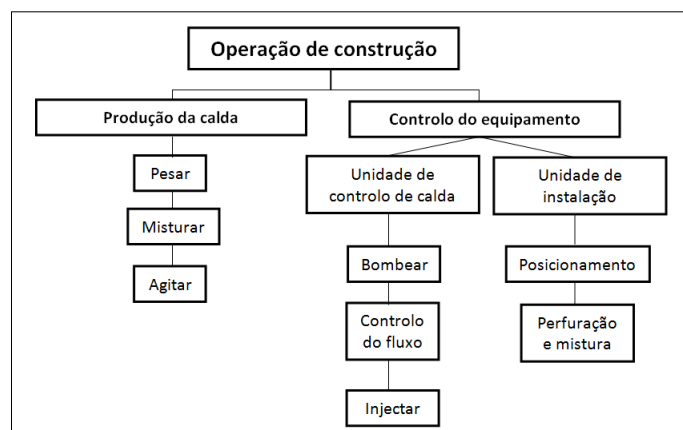


Figura 4.9 – Fluxograma da operação de construção (adaptado de Rutherford *et al*, 2005)

#### 4.2.2 Vantagens e limitações de DSM como solução de contenção de escavações (SMW)

Como foi apresentado no Capítulo 3, a técnica *Deep Soil Mixing* permite obter, a partir do solo inicial, um novo material de características semelhantes a uma rocha branda, permitindo assim viabilizá-lo para uma contenção. As quantidades de materiais e tipo de mistura podem ser manipulados de forma a obterem-se as características de melhoramento e contenção que se pretendem para o caso determinado, como, por exemplo, a resistência do solo-cimento pode ser ajustada com base nos requisitos do projeto, variando as quantidades de cimento e água.

Com esta técnica existe a possibilidade de instalação de elementos de reforço (se necessários), de elevada resistência à flexão no interior do solo-cimento.

A tecnologia DSM, tal como acontece com a maioria das técnicas de suporte de escavação, tem limitações em solos com presença de elementos de granulometria grosseiras (calhaus ou blocos). A profundidade construtiva está muitas vezes baseada nas limitações do equipamento de perfuração e mistura. A tabela 4.2 apresenta um resumo de algumas vantagens e limitações das *Soil Mixed Walls* em comparação com outras soluções de contenção de escavações.

Tabela 4.2 – Principais vantagens e limitações das SMW (Bruce, 2000)

Tecnologias alternativas	Paredes moldadas; contenções Berlim; estacas-prancha; estacas de betão.
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo relativamente baixo por unidade de área;</li> <li>• Permeabilidade relativamente baixa, não necessitando de impermeabilizações complexas;</li> <li>• Quando ainda fresco, há possibilidade de introdução de elementos de reforço;</li> <li>• Proporciona uma boa continuidade lateral;</li> <li>• O refluxo pode ser aproveitado para a possível construção de plataformas de coroamentos;</li> <li>• Pouca vibração, ruído médio-baixo;</li> <li>• Alta produção em certas condições;</li> <li>• Pode ser aplicada a solos estratificados e heterogêneos e com presença de níveis freáticos.</li> </ul>
<b>Limitações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode haver limitações nas profundidades de tratamento relacionadas com o equipamento;</li> <li>• Devido às dimensões do equipamento, torna-se necessário haver uma vasta e desimpedida área de trabalho.</li> <li>• Limitações em solos muito densos, muito duros, ou em presença de calhaus ou blocos,</li> <li>• Há alternativas que não produzem excedente de material</li> </ul>

#### 4.2.3 Painéis de *Cutter Soil Mixing*

O princípio da tecnologia *Cutter Soil Mixing* (CSM), variante da técnica *Soil Mixing* e que utiliza alguns princípios de execução de paredes moldadas (nomeadamente o equipamento, que neste caso consiste numa hidrofresa), consiste, numa primeira fase, na desagregação do solo por ação mecânica de rodas de corte em torno de um eixo horizontal.

Esta técnica foi desenvolvida e testada em 2003 pela empresa *Bauer Maschinen*, na Alemanha e consegue formar paredes contínuas de painéis de solo-cimento (Sousa, 2009). A principal diferença entre esta técnica e os métodos tradicionais DSM está na ação mecânica das rodas, que giram em torno de eixos horizontais em vez de eixos verticais (que resultam em colunas de solo-cimento), construindo, assim, painéis retangulares de solo-cimento com um número de juntas muito reduzido (figura 4.10).

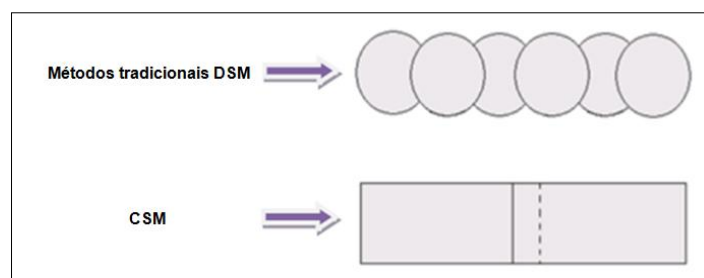


Figura 4.10 – Diferença entre os painéis de solo-cimento construídos com DSM e com CSM (Sousa, 2009)

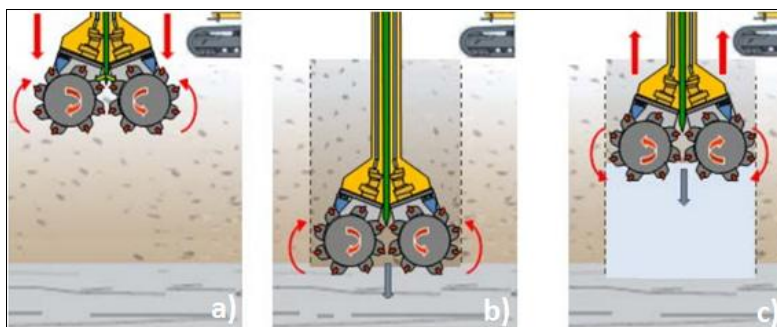
O equipamento, como já dito, consiste numa hidrofresa, podendo ser suportada por um sistema de varas *Kelly* que pode ir até 35m de profundidade, ou por um sistema de cabos de suspensão, para profundidades superiores (figura 4.11).

Quanto ao procedimento executivo de painéis CSM, uma vez definido o local de implantação dos painéis, alinha-se o equipamento e a ferramenta de corte é introduzida no terreno (figura 4.12a) a velocidade constante, desagregando-o. Durante a fase de descida, é introduzida a calda de cimento, controlando-se a velocidade e o volume de calda (figura 4.12b). A segunda fase consiste na extração do equipamento. Durante esta fase, é introduzida novamente calda de cimento, de modo a homogeneizar a mistura (figura 4.12c).



a) Hidrofresa; b) Execução de um painel de solo-cimento; c) sistema de varas *Kelly*; d) sistema de cabos de suspensão

**Figura 4.11 – Equipamento da técnica CSM (Sousa, 2009)**



a) Introdução da ferramenta de corte; b) Descida e introdução da calda de ligante; c) Extração de equipamento e nova introdução de ligante

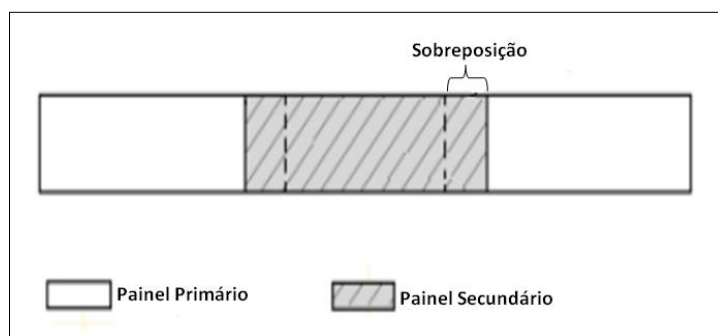
**Figura 4.12 – Procedimento executivo de um painel de solo-cimento usando a tecnologia CSM (Sousa, 2009)**

O resultado final apresenta-se na figura 4.13.

A construção de uma parede constituída por painéis CSM é feita de forma sequencial, por painéis primários e secundários, garantindo uma sobreposição parcial e a solidarização dos mesmos, como se pode ver na figura 4.14.



**Figura 4.13 – Painel final realizado com a tecnologia CSM (adaptado de Lopes, 2010)**



**Figura 4.14 – Sequência de execução de painéis (adaptado de Lopes, 2010)**

#### **4.2.4 Contenção de colunas de *Deep Soil Mixing***

O processo construtivo de uma contenção com colunas DSM inclui as etapas que seguidamente se referem:

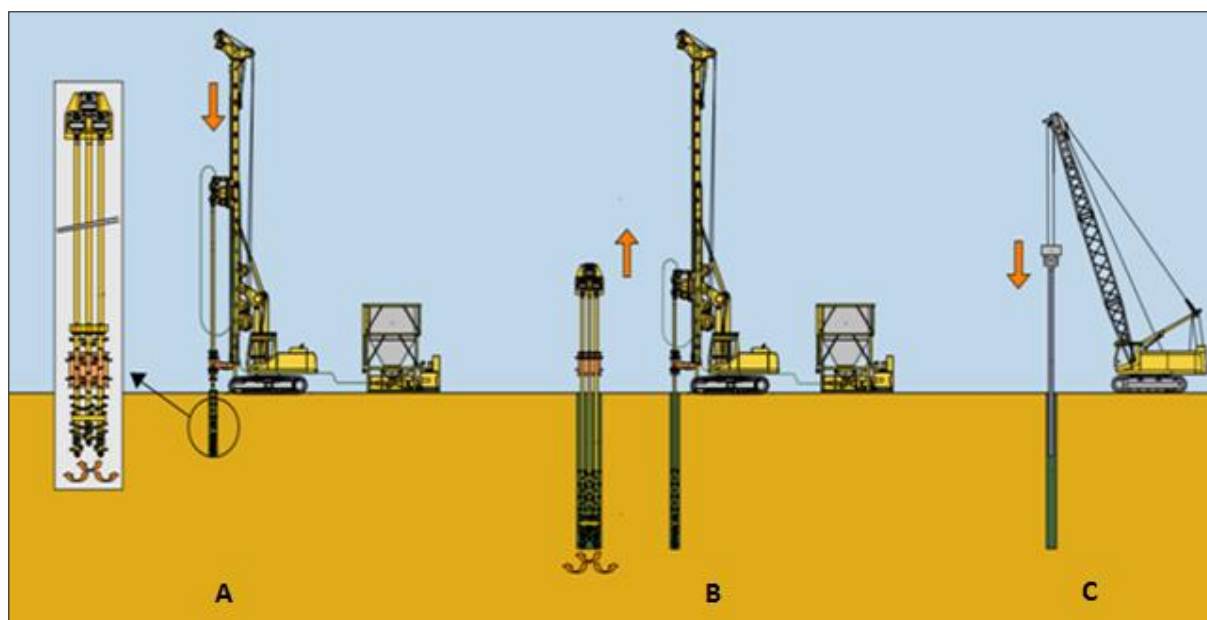
Antes da penetração do equipamento no solo, é cavada uma vala ao longo do alinhamento da *Soil Mixed Wall* para reter o solo e excessos de calda (refluxo) que possam ascender à superfície, sendo removidos quando necessário e é colocado também um molde de referência e alinhamento. A dimensão da vala varia com a profundidade de penetração e espaço disponível. Seguidamente, posiciona-se e alinha-se o equipamento no local onde se pretende construir a cortina. A figura 4.15 apresenta um exemplo esquemático dos principais passos de instalação de uma SMW.

No passo A da figura 4.15, a ferramenta de mistura perfura o terreno e, simultaneamente, injeta-se o ligante em calda. Neste exemplo, as aletas externas giram numa direção oposta à das aletas do veio central. Controla-se a taxa de penetração e o volume de calda adicionado ao solo de modo a que excedentes de calda e solo que ascendam à superfície sejam mínimos.



Quando se atinge a profundidade estipulada no dimensionamento, a ferramenta de mistura é retirada, enquanto se continua a adicionar ligante ao solo (figura 4.15 B). Após a construção do primeiro e segundo conjunto de colunas, o passo anterior repete-se entre os dois. Por fim, procede-se à instalação de elementos de reforço no interior das colunas – perfis metálicos – após a conclusão da primeira série de colunas, antes do material começar a ganhar presa (figura 4.15 C) (Rutherford *et al*, 2005).

A instalação de colunas contínuas obedece à sequência apresentada na figura 4.16. A *Soil Mixed Wall* é formada a partir da sobreposição de colunas contínuas, neste caso, obtidas com três veios, da seguinte forma (Donald *et al*, 2001): construção das colunas iniciais 1, 2 e 3; construção das colunas 5, 6 e 7; remistura das colunas 3 e 5, criando as colunas 3' 4 e 5'. A sequência é repetida até se formar o comprimento total da cortina estipulado em projeto.



**Figura 4.15 – Principais passos para a construção de uma cortina com a técnica *Soil Mixing* (adaptado de Bauer, 2010)**

Os padrões de colunas podem ser variados a nível do espaçamento entre elas (secantes, tangentes ou afastadas) ou na distância à frente de escavação. Na figura 4.17 apresenta-se o padrão típico de colunas DSM para formarem uma cortina de contenção de escavação.

O equipamento para a construção de colunas DSM para suporte de escavações é especializado para o efeito. As ferramentas de perfuração e mistura e a unidade de mistura para criação da calda são os dois equipamentos principais.



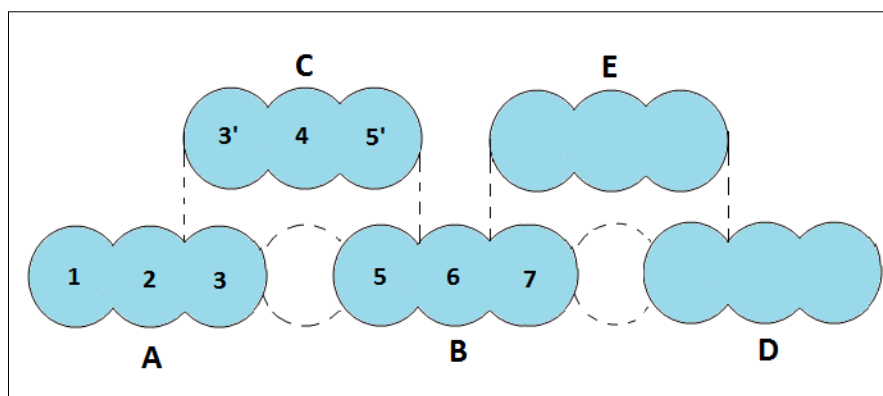


Figura 4.16 – Sequência de instalação das colunas para formar uma SMW

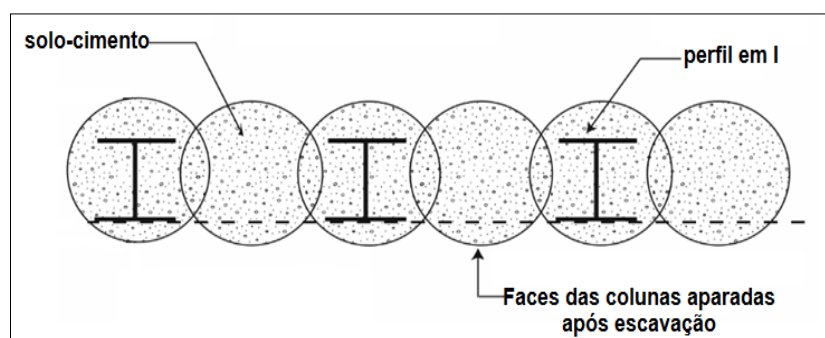


Figura 4.17 – Padrão típico das colunas de DSM para formar uma SMW (Rutherford *et al*, 2005)

A ferramenta de mistura consiste num trado de eixos múltiplos com uma caixa de velocidades, motor elétrico, estrutura metálica de ligação dos veios (junta), veios perfuradores e de mistura e três ou quatro cabeças providas de brocas (figura 4.18, figura 4.19 e figura 4.20).

O alinhamento vertical deve ser controlado para evitar zonas não misturadas entre conjuntos de colunas e permitir manter a continuidade da cortina em profundidade. A estrutura metálica de ligação dos veios proporciona-lhes rigidez e não permite que estes se desloquem, mantendo assim o espaçamento entre as brocas. A sobreposição das aletas ou pás misturadoras permite a construção de 3 ou 4 colunas de solo-cimento durante cada passagem. As dimensões das pás e brocas são em função dos diferentes tipos de solo e adaptadas para os requisitos de projeto. As velocidades de penetração e recuperação são determinadas pelas propriedades do solo e pelo esforço necessário para obter as características da mistura estipulados em projeto. O caudal de calda adicionada ao solo é ajustado constantemente devido à possível existência de várias camadas de solo e mudanças de velocidade de penetração e mistura.

Na secção 1 da figura 4.19, o solo é desagregado na base de cada broca com duas cabeças de corte exteriores e uma central. As exteriores rodam em direções opostas e, enquanto as brocas desagregam o solo, a calda é adicionada ao solo através de bocais existentes na base de cada broca.

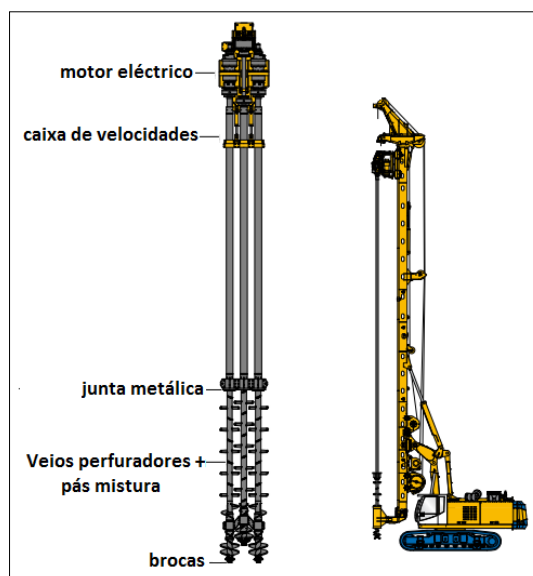


Figura 4.18 – Exemplo de equipamento DSM com três veios (adaptado de Bauer, 2010)

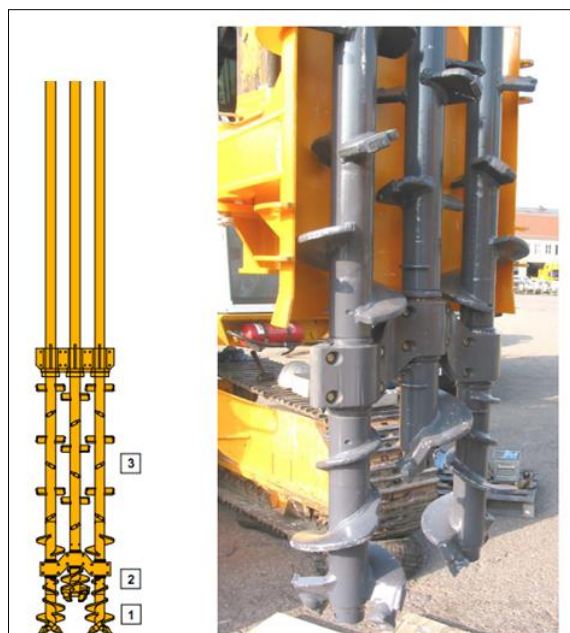


Figura 4.19 – Pormenor dos veios da ferramenta DSM (adaptado de Bauer, 2010)

Na secção 2 da figura 4.19, pás mais pequenas deslocam o solo e o ligante para cima. Por fim, a área de mistura é localizada acima das brocas (secção 3). A contra-rotação e sobreposição das aletas ou pás garantem a homogeneidade da mistura. Um pormenor da secção 3 pode ser observado na figura 4.20 e o resultado final pode ser observado na figura 4.21.

A unidade de mistura é usada para produzir a calda e automatizada para medir as quantidades de cimento, água e aditivos. A calda é ministrada a cada veio por meio de bombas. Na figura 4.22 apresenta-se uma planta de instalação do equipamento para a construção de painéis DSM.



Figura 4.20 – Pormenor da secção 3 dos veios de rotação (adaptado de Retainingwall-Solution, 2012)



Figura 4.21 – Resultado final de uma parede de DSM (adaptado de Retainingwall-Solution, 2012)

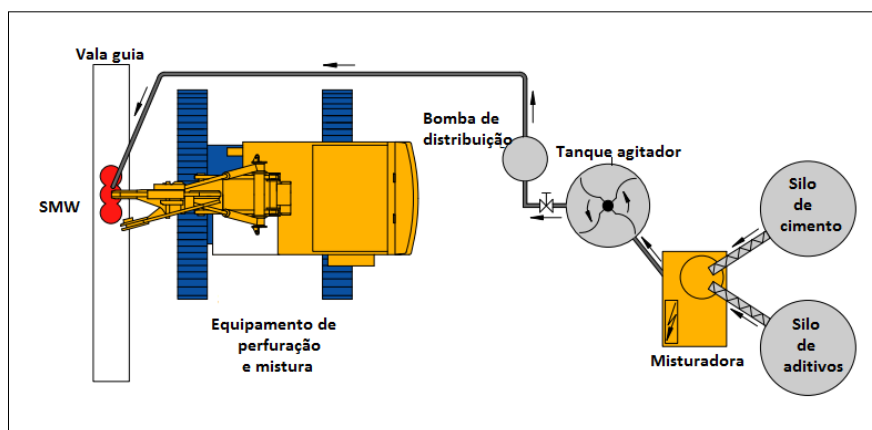


Figura 4.22 – Esquema da instalação do equipamento DSM (adaptado de Bauer, 2010)

#### 4.2.5 Contenção tipo VERT Wall

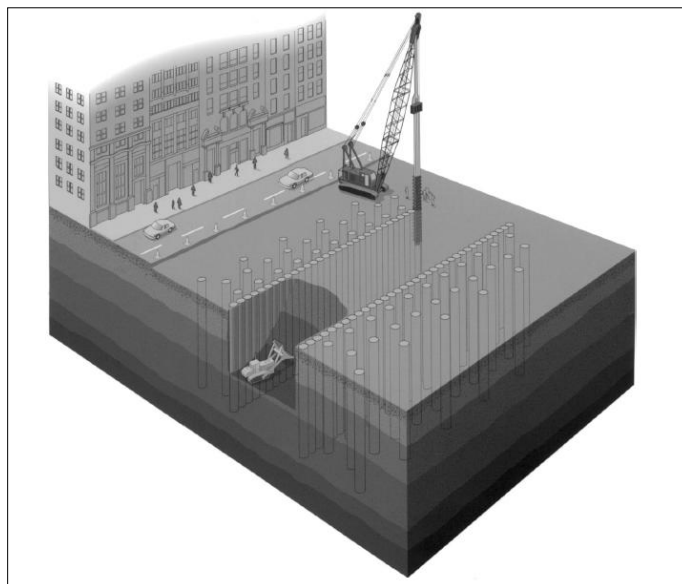
Trata-se de um tipo de contenção que pode ser considerado como um caso particular de contenção de colunas de DSM.

O sistema VERT Wall (*Vertical Earth Reinforcement Technology*) foi desenvolvido pela empresa Geo-Con, Inc. e consiste numa contenção que não necessita de ancoragem ou escoramento. É constituída por quatro elementos estruturais principais: colunas de DSM; um coroamento ou plataforma de alívio no topo construído com os refluxos das colunas; perfis metálicos de reforço embebidas no interior das colunas e, uma “face” de betão na frente de escavação.

As colunas podem variar o diâmetro até 2,5 m, a profundidade vai até um máximo de 12 m e a plataforma de alívio tem aproximadamente 1 m de espessura. A frente de betão, quando necessária, pode consistir num painel pré-moldado de betão.

A disposição das colunas faz com que estas se comportem como uma estrutura de gravidade. A estabilidade externa e interna da VERT Wall deriva da ação composta entre a sobreposição ou tangência das colunas de solo-cimento, formando um painel ao longo da frente de escavação, acompanhada por duas ou três linhas de colunas escalonadas detrás desse painel, com a plataforma de coroamento que une todas as colunas (figura 4.23). Deste modo, as colunas funcionam em conjunto, ajudando a transferir cargas para a base das mesmas, evitando transferência de cargas laterais para a frente de escavação (HITEC, 2002).

Para estudar o comportamento deste sistema, a Geo-Con construiu e instrumentou uma cortina do tipo VERT WALL à escala real no NGES (National Geotechnical Experimentation Site) na Universidade do Texas.



**Figura 4.23 – Conceito de VERT Wall – plataforma de alívio não representada (adaptado de HITEC, 2002)**

O terreno consistia em depósitos de areia com alto conteúdo de finos, com intercalações ocasionais de argila. As suas características eram: resistência de ponta  $q_c$  de 6 MPa com CPT; ângulo de resistência ao corte de  $32^\circ$ ; peso volumico  $18 \text{ kN/m}^3$  e teor de água de 15%. O firme achava-se, aproximadamente, a 10m da superfície e o nível freático a 7,2m.

A resistência de projeto do solo-cimento aos 28 dias era de 690 kPa, antes da escavação começar. A construção evidenciou a importância de duas características: a existência de uma plataforma de solo-cimento no topo da cortina para solidarizar as colunas e o reforço da linha de colunas na frente de escavação para resistir à flexão, para além da resistência à tração da mistura solo-cimento.

### Construção

Antes da construção, foi colocado no topo da superfície do solo original 1m de espessura de solo para assegurar que o nível de escavação final permaneceria acima do nível freático. As colunas de solo-cimento foram construídas com equipamento de mistura e corte com 0,91m de diâmetro. A calda de mistura consistiu numa razão A/C de 1,75:1 e a razão entre a calda de cimento e o solo foi de 0,55. As colunas de solo-cimento atingiram uma profundidade de 8,5m, desde a camada de 1m de solo acrescentado. A linha de colunas da frente de escavação (Linha A – figura 4.24) consistiu em 43 colunas tangentes. Imediatamente atrás foi construída outra linha (Linha B – figura 4.24) com colunas espaçadas de 1,82 m entre centros. Uma terceira (Linhas C – figura 4.24) e quarta (Linha D – figura 4.24) linhas foram construídas, mantendo esse espaçamento. No topo da cortina, foi construída uma plataforma de ligação usando os refluxos de solo-cimento de cada furo, abrangendo 3/4 da cortina. Nas figura 4.24 e figura 4.25 podem ser observados esquemas da cortina VERT Wall e na figura 4.26 o resultado final.



### Desempenho

Foram realizados ensaios de compressão uniaxial em várias amostras colhidas a várias profundidades aos 3, 7, 28 e 56 dias de cura. O valor mais baixo da resistência aos 28 dias foi o dobro do valor estipulado em projeto. Também foram colhidas amostras no núcleo das colunas aos 28 dias após a construção e ensaiadas para a resistência à compressão uniaxial, obtendo-se uma média de valores na ordem dos 2070kPa. Pela observação dos inclinômetros, constatou-se que a plataforma teve o efeito de reduzir a deflexão máxima da cortina. Um ano e meio após a construção, a deflexão horizontal no topo da cortina foi de 0,025m e o assentamento vertical foi de 0,0093m (Briaud *et al*, 2000).

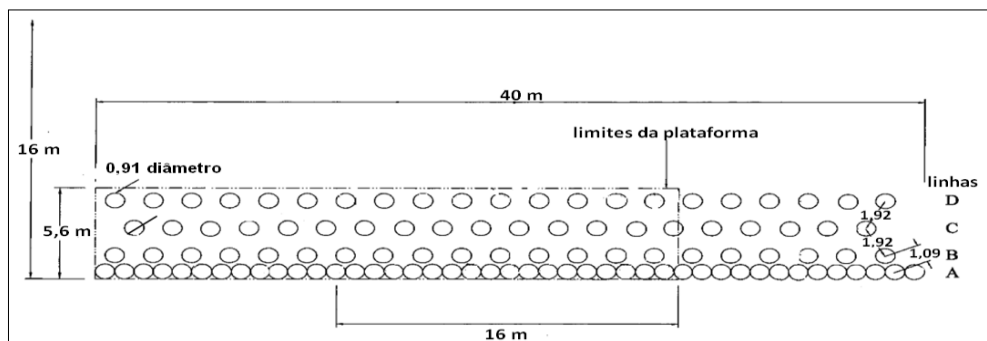


Figura 4.24 – Planta da VERT Wall (adaptado de Briaud *et al*, 2000)

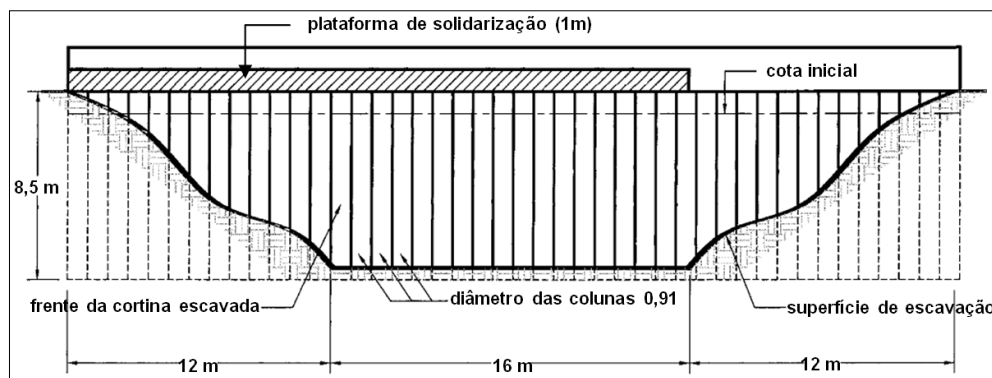


Figura 4.25 – Vista da frente da VERT Wall (adaptado de Briaud *et al*, 2000)



Figura 4.26 – Resultado final da VERT Wall (adaptado de Rutherford, 2004)

## 5 Aspectos do dimensionamento de contenções

### 5.1 Introdução

O princípio geral deste tipo de contenção baseada no DSM, também designada SMW, consiste em utilizar o solo-cimento eventualmente combinado com elementos de reforço, para criar uma estrutura que suporta tensões laterais e restringe movimentos de descompressão de terras, controlando deformações e assentamentos das estruturas envolventes, podendo até funcionar como barreira impermeável. Em geral, uma *Soil Mixed Wall* (SMW) consiste em sobrepor colunas de solo-cimento e eventualmente inserir perfis metálicos verticalmente antes do material ganhar presa. Comparando, por exemplo, com as convencionais contenções Berlim, estes perfis metálicos podem funcionar, da mesma forma, para resistir à flexão e as colunas de solo-cimento como painel entre os perfis que transfere tensões para os mesmos (Jameson, 1996).

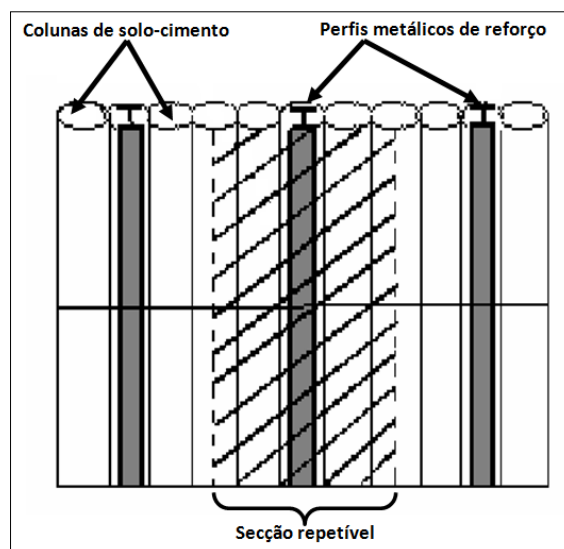
A cortina construída a partir da técnica *Deep Soil Mixing* deve ser dimensionada e executada para que a estrutura, durante a vida útil e com grau adequado de fiabilidade, permaneça apta para a utilização a que se destina e se mantenha estável para todas as ações que possam ocorrer durante a execução e uso. Tal como em qualquer outro tipo de estrutura, exige-se que os Estados Limites Último e de Utilização sejam verificados.

O dimensionamento deste tipo de estruturas é largamente baseado em experiência acumulada e estudos de projetos já executados, sendo que, o projeto é concluído apenas no início da fase construtiva, após a execução de blocos de ensaios. O controlo de qualidade torna-se extremamente importante para garantir os resultados pretendidos.

### 5.2 Princípios gerais do dimensionamento de uma cortina

O dimensionamento das cortinas SMW é baseado no conceito de secção repetível. A cortina é dividida em secções repetíveis, sendo que cada secção é o menor troço da cortina que, ao repetir-se, forma o comprimento total da mesma. Por exemplo, sem qualquer elemento estrutural de reforço, a secção repetível toma-se como sendo aquela de largura igual à distância entre eixos de colunas. Se forem usados repetidamente perfis metálicos, a largura dessa secção repetível é igual à distância entre pontos médios dos painéis de colunas sem perfis (figura 5.1).

Apresenta-se na figura 5.2 um fluxograma que define uma estrutura de diretrizes generalizadas para o dimensionamento de uma *Soil Mixed Wall*. Alguns dos aspetos definidos, como por exemplo a análise de impulsos de terras, não serão abordados no âmbito deste trabalho. Trata-se de aspetos idênticos aos associados a outros tipos de estruturas de contenções de escavações mais comuns, não representando um interesse particular em explicá-los detalhadamente, no âmbito da presente dissertação.



**Figura 5.1 – Esquema representativo de uma secção repetível (adaptado de Rutherford, 2004)**

Acompanhando a figura 5.2, percebe-se que o processo de dimensionamento se inicia com a caracterização geotécnica do terreno. Este estudo estará evidentemente presente numa fase inicial de qualquer projeto de cortinas de contenção de escavações. Para o tipo de cortinas em questão – *Soil Mixed Wall* – a importância deste estudo estará relacionada com o facto de o solo local ser elemento constituinte do material final da estrutura de contenção. Para se definirem os parâmetros do projeto e os critérios de desempenho são necessários os valores obtidos do estudo geotécnico do solo e resultados de ensaios em misturas criadas em laboratório, e assim caracterizar o novo material solo-cimento. Os valores das características resistentes do material irão contribuir para definir os critérios de desempenho da cortina.

Relativamente à análise de percolação de água, ela é semelhante à que é habitualmente efetuada para uma cortina convencional. A cortina SMW poderá ter que ser dimensionada para resistir a impulsos de água a montante e na base da mesma.

Aspetos como estabilidade global, a análise de impulsos de terras e da água, profundidade de embebimento, momentos flettores e movimentos, tendem a ser efetuados da mesma forma que para uma cortina tradicional. Deve ter-se sempre em conta que o material solo-cimento irá contribuir para a estabilidade e resistência da cortina e, por isso, a importância do estudo laboratorial já referido.

A capacidade resistente vertical da cortina pode ser avaliada a partir do somatório da capacidade resistente individual de cada coluna, ponderando eventuais aspetos de interação.



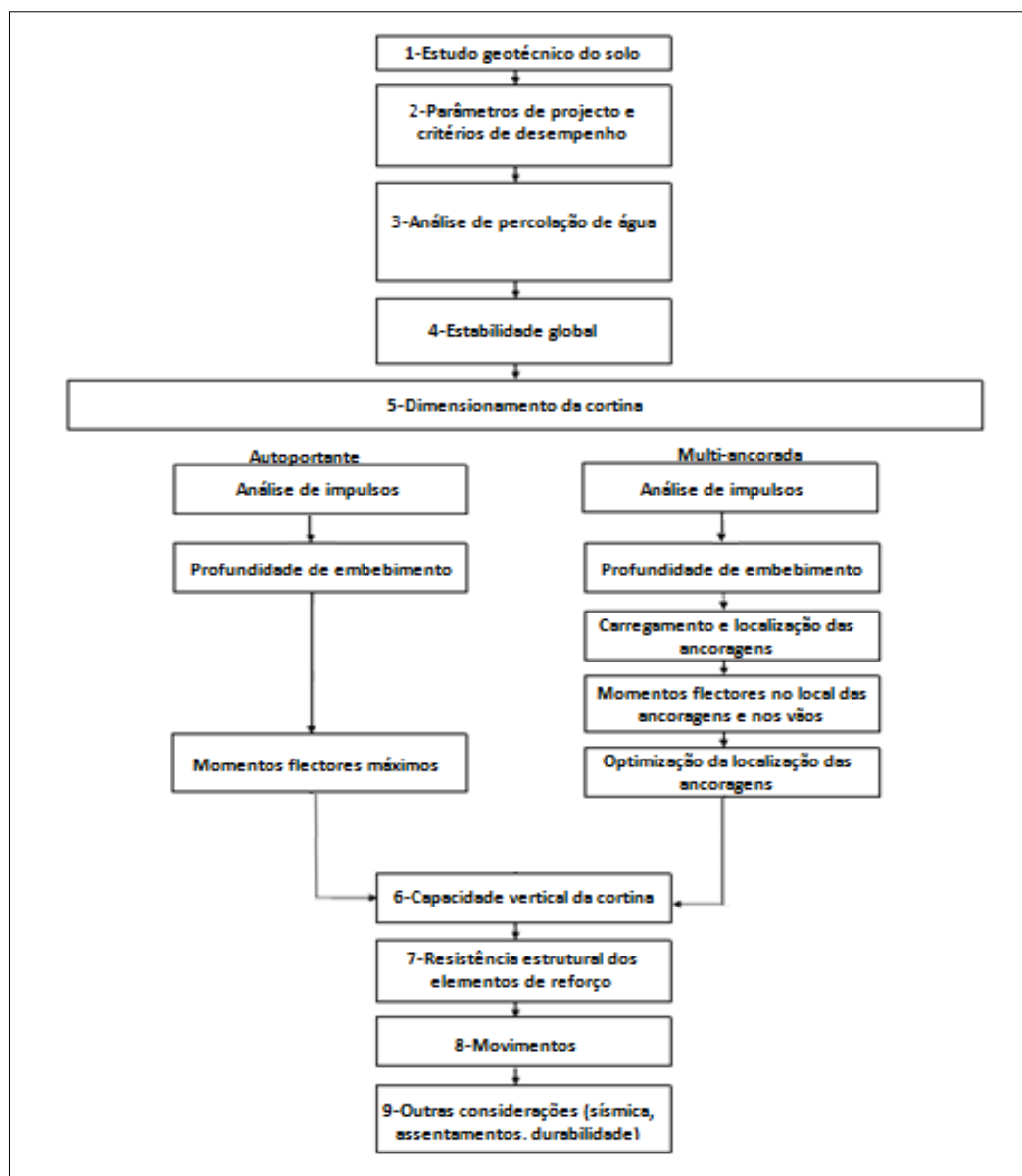


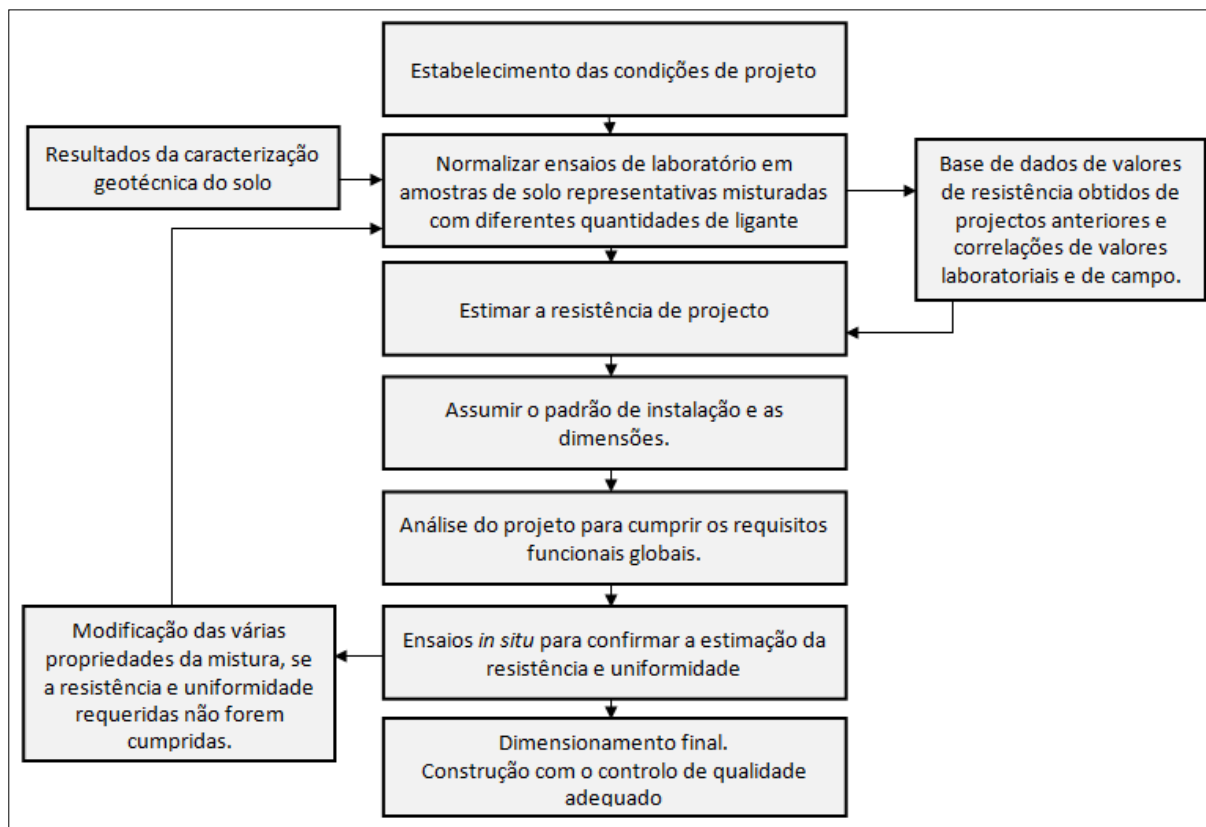
Figura 5.2 - Diretrizes gerais para o dimensionamento de uma SMW (adaptado de Rutherford, 2004)

Num passo seguinte, devem ser projetados os elementos estruturais da cortina. Como mencionado anteriormente, o solo-cimento tende a funcionar como uma estrutura de ligação entre perfis metálicos tal como numa cortina Berlim, resistindo a impulsos laterais e redistribuindo essas tensões para os elementos metálicos adjacentes.

Devem ter-se ainda em conta outras considerações como a análise sísmica. Para uma contenção temporária, os carregamentos sísmicos, normalmente, não são contabilizados. Quando a contenção é projetada para ser definitiva, as resistências sísmicas, assim como a durabilidade, devem ser consideradas.

Assinala-se ainda que o dimensionamento feito para uma SMW tende a ser iterativo. Complementando o fluxograma da figura 5.2 anterior, apresenta-se um outro na figura 5.3. Da figura

compreende-se que, através de ensaios *in situ*, se deve procurar verificar se os valores dos parâmetros, como a resistência e a uniformidade do solo-cimento, correspondem aos valores estimados. Se tal não acontecer, procede-se a uma nova mistura modificando, por exemplo, as quantidades dos elementos constituintes da mesma ou o processo construtivo.



**Figura 5.3 – Processo de dimensionamento iterativo, incluindo ensaios laboratoriais, dimensionamento funcional, ensaios *in situ* e dimensionamento do processo (adaptado de EN 14679, 2005)**

### 5.3 Geometrias da contenção

As geometrias que podem ser assumidas na contenção de uma escavação através de uma *Soil Mixed Wall* dependem estreitamente dos processos construtivos. Ou seja, fatores como a disponibilidade e tipo de equipamentos ou área de trabalho disponível podem determinar a geometria da contenção pretendida para cada caso.

Devido a estes fatores, a geometria mais comum de uma SMW tende a basear-se na simples sobreposição de colunas num alinhamento, como exemplificado na figura 5.4.

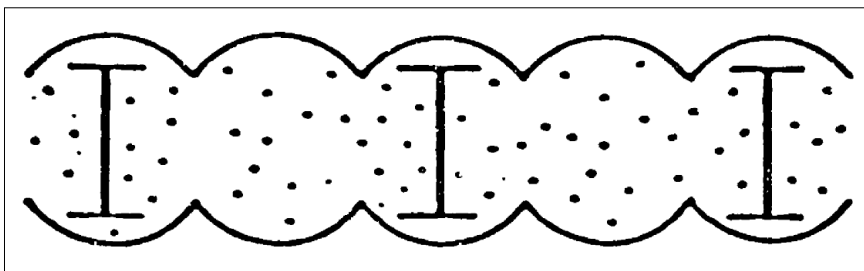


Figura 5.4 – Geometria mais usual de uma cortina de solo-cimento (Jameson, 1996)

Em casos menos comuns, podem vir a constituir-se geometrias mais complexas. Além das condicionantes mencionadas, a capacidade autoportante do solo pode ser também fator determinante. No entanto, o facto de o *Deep Soil Mixing* ser uma técnica de melhoramento de terrenos, o solo envolvente pode vir a ser afetado por esse melhoramento. Assim sendo, apresentam-se de seguida outras geometrias para uma SMW (figura 5.5 a figura 5.8).

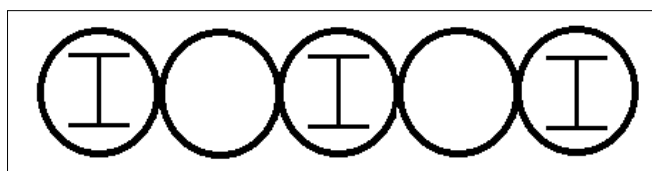


Figura 5.5 – Alinhamento de colunas tangentes

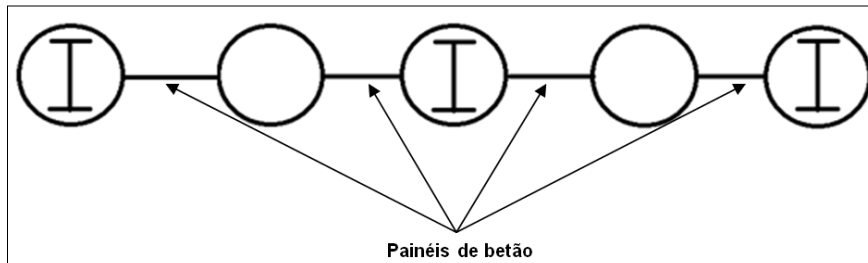


Figura 5.6 – Alinhamento de colunas afastadas (neste caso com um painel de betão para ligação)

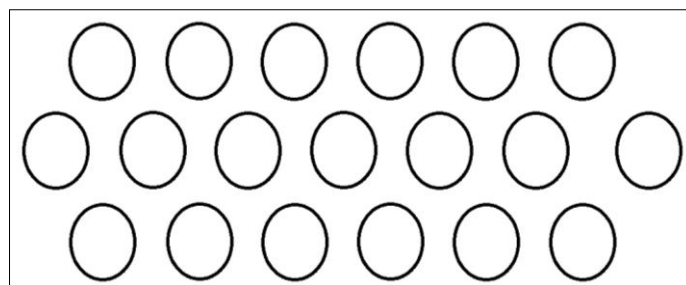
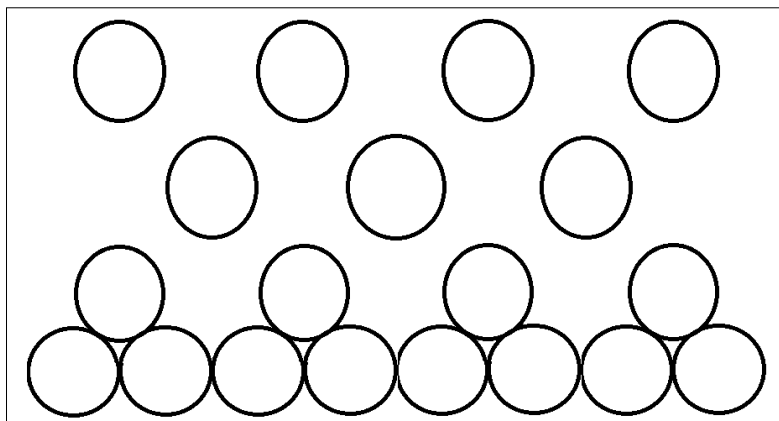
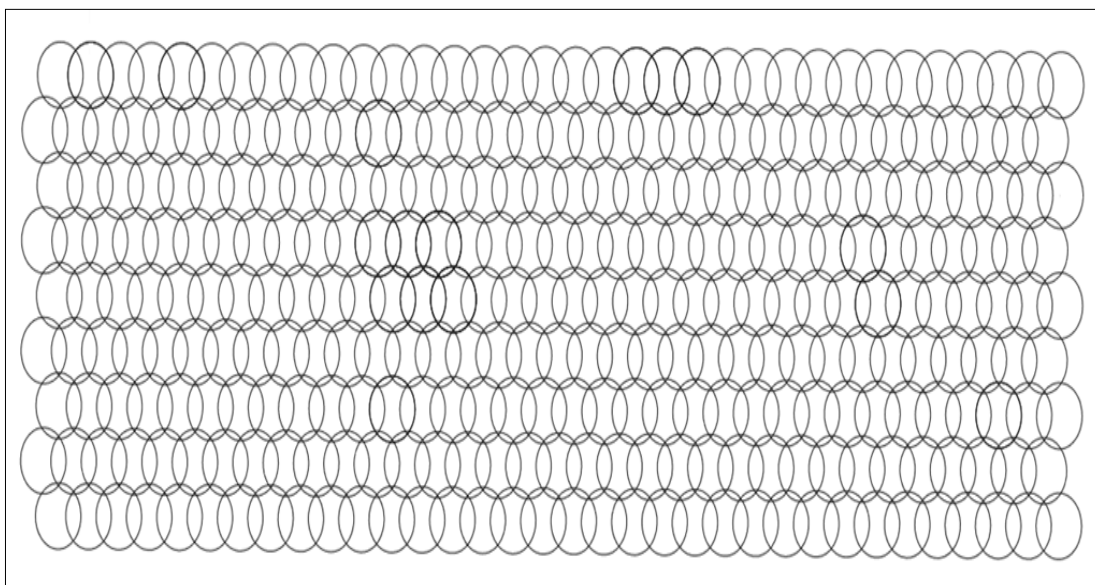


Figura 5.7 – Contenção de colunas com padrão em quincôncio

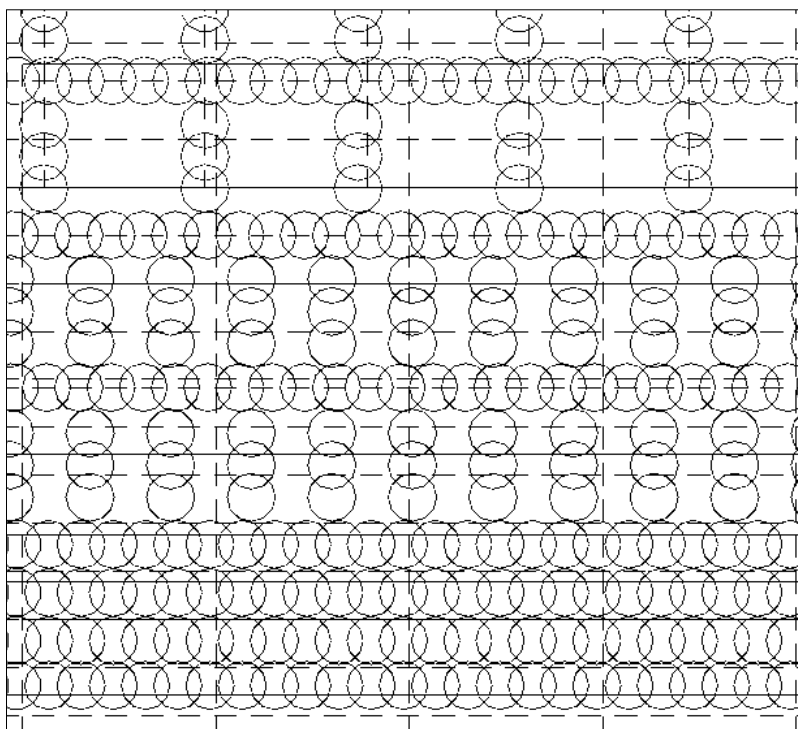


**Figura 5.8 – Geometria de uma VERT WALL**

Foram ainda encontradas na bibliografia algumas geometrias mais invulgares, como o caso representado na figura 5.9, que consiste num muro de gravidade para a contenção de uma escavação no aeroporto de Oakland, Califórnia (Yang, 2003). Outro exemplo, ilustrado na figura 5.10, é o de um muro de gravidade para a contenção de uma escavação numa refinaria nas Ilhas Virgem (Yang, 2003). É de notar que estes padrões de instalação de colunas constituíram verdadeiros muros de gravidade e não cortinas flexíveis.

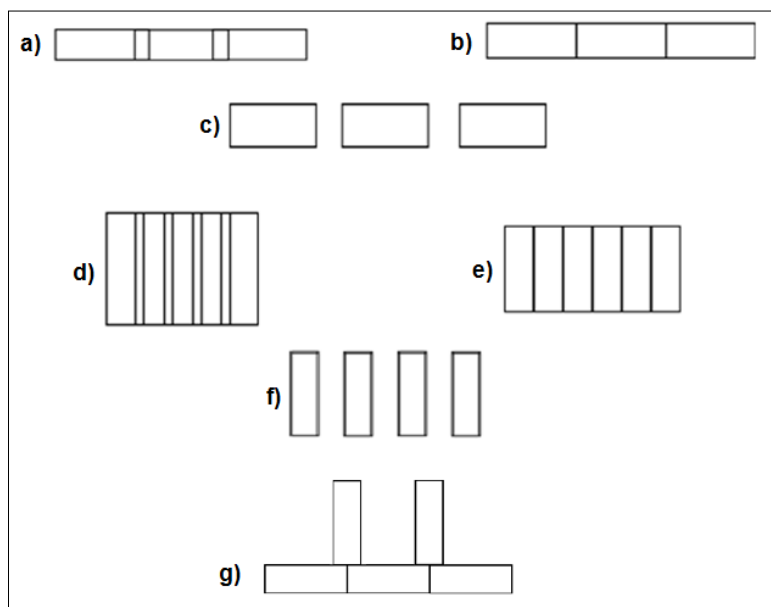


**Figura 5.9 – Muro de gravidade para contenção de uma escavação em Oakland, Califórnia (adaptado de Yang, 2003)**



**Figura 5.10 – Muro de gravidade para contenção de uma escavação nas Ilhas Virgem (adaptado de Yang, 2003)**

Faz-se ainda referência às geometrias de contenções com painéis *Cutter Soil Mixing*. Na figura 5.11 encontram-se alguns arranjos geométricos dos painéis. Embora não ilustrada, considera-se ainda a possibilidade da combinação geométrica entre painéis CSM e colunas DSM.



a) e d) sobrepostos; b) e e) tangentes; c) e f) afastados; g) combinação de duas disposições

**Figura 5.11 – Alguns exemplos de geometrias de painéis CSM**

## 5.4 Estados limites

Às verificações de segurança em Engenharia Civil estão associadas à definição de Estados Limites Últimos (ELU) e de Utilização (ELU<sub>u</sub>). Os ELU estão diretamente relacionados com cenários de rotura, enquanto que os ELU<sub>u</sub> estão associados a cenários de funcionalidade da estrutura,

Os ELU em qualquer tipo de cortinas compreendem aqueles correspondentes à rotura do terreno, à rotura dos elementos estruturais, ou a uma combinação destas duas. Os ELU<sub>u</sub> estão, em regra, relacionados com os deslocamentos e/ou vibrações que possam pôr em causa o comportamento da cortina e/ou de estruturas adjacentes.

O Eurocódigo 7 abrange vários estados limites últimos e de utilização, tornando a lista algo extensa. Dos vários tipos de estados limites a serem considerados numa *Soil Mixed Wall* destacam-se alguns importantes como (NP EN 1997-1, 2010):

- perda de estabilidade global (figura 5.12);
- rotura por rotação ou translação excessivas da cortina ou de partes desta ocasionando a rotura do próprio terreno (figura 5.13);
- rotura por perda de equilíbrio vertical da cortina (figura 5.14);
- rotura de um elemento estrutural ou rotura conjunta do terreno e de um elemento estrutural (figura 5.15). No caso de uma *Soil Mixed Wall*, os elementos estruturais constituintes consistem nas colunas de solo-cimento. Neste estado limite, a rotura de um elemento estrutural corresponde à rotura de elementos de solo-cimento;
- rotura das ancoragens por arranque. (figura 5.16).

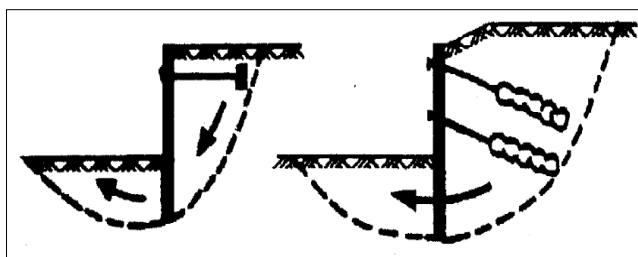


Figura 5.12 – Exemplos de estados limites últimos por perda de estabilidade global (adaptado de NP EN 1997-1, 2010)

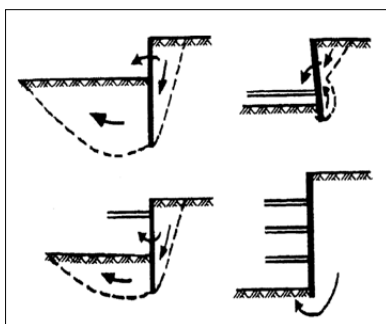


Figura 5.13 – Exemplos de estados limites últimos por rotação da cortina (adaptado de NP EN 1997-1, 2010)

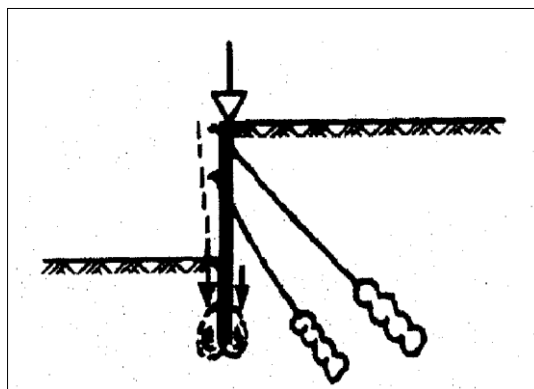


Figura 5.14 – Exemplo de estado limite último de uma cortina por perda de equilíbrio vertical (adaptado de NP EN 1997-1, 2010)

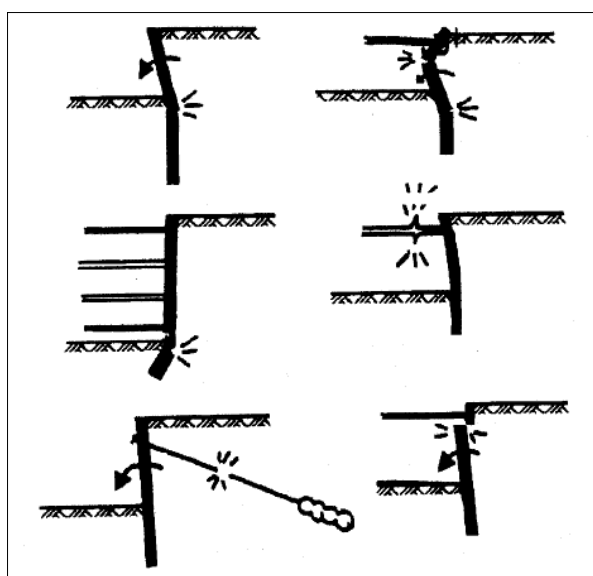


Figura 5.15 – Exemplos de estados limites últimos devidos a rotura estrutural (adaptado de NP EN 1997-1, 2010)

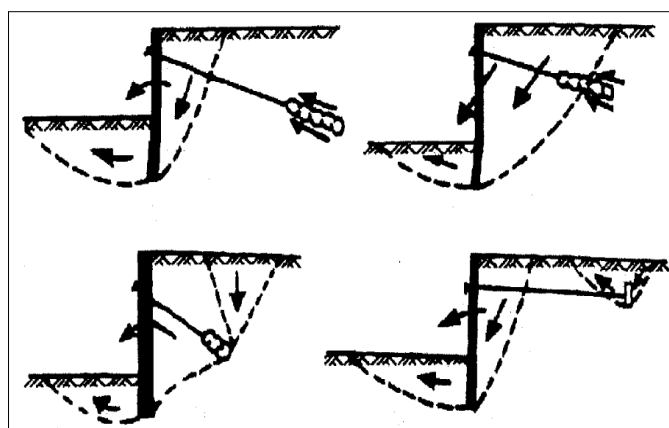


Figura 5.16 – Exemplos de estados limites últimos devidos à rotura por arranque das ancoragens (adaptado de NP EN 1997-1, 2010)

Segundo o Eurocódigo 7, devem ainda ser consideradas combinações dos vários estados limites referidos.

## **5.5 Dimensionamento**

Como referido anteriormente, o dimensionamento de uma *Soil Mixed Wall* pode tornar-se semelhante ao dimensionamento de cortinas tradicionais, nomeadamente de cortinas do tipo Berlim. Existe, no entanto, um ponto singular nas SMW. Trata-se do facto de as características mecânicas do material que constitui a cortina propriamente dita não serem conhecidas à partida, o que obriga, em cada projeto, à realização de uma campanha de ensaios (em laboratório e *in situ*)

### **5.5.1 Métodos de dimensionamento**

Para o cálculo dos esforços em cortinas podem ser utilizadas várias metodologias, desde os métodos mais tradicionais, baseados nos princípios da análise limite ou do equilíbrio limite, até à utilização dos modelos numéricos, baseados em técnicas como os elementos finitos.

A definição da metodologia de cálculo mais adequada pode ser condicionada por fatores como a complexidade da cortina até ao tipo de meios de cálculo automático disponíveis.

Os modelos de cálculo mais utilizados consistem, em regra, na análise de uma “fatia” da cortina, ou secção repetível, cuja largura é representativa da zona em estudo. Trata-se de uma metodologia de cálculo baseada numa análise bidimensional da estrutura, sendo possível obter deformações e esforços na direção perpendicular ao plano da cortina.

Para a análise de estruturas mais complexas, os modelos referidos podem ser insuficientes. Em cortinas de *Deep Soil Mixing* do tipo VERT WALL (descrita no capítulo 4.2.5), o cálculo dos esforços e interação entre elementos da cortina tende a ser bastante complexo, podendo ser necessária uma análise tridimensional.

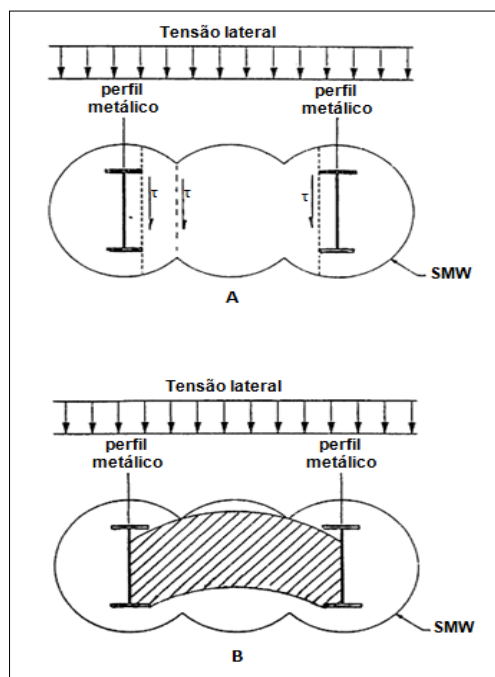
### **5.5.2 Verificação dos cenários do dimensionamento**

A aplicação dos estados limites a cortinas de solo-cimento envolve problemas próprios mas semelhantes a outros tipos de cortinas, especialmente a identificação adequada de modos de rotura da cortina. Como o solo-cimento tende a ser um material geotécnico em que o seu comportamento sob o efeito das ações depende de muitos fatores, as previsões relativas ao comportamento da estrutura podem ser complexas. O objetivo último será atingir um adequado comportamento da cortina e do terreno suportado, com deslocamentos compatíveis com o meio envolvente (Guerra, 2012).



Como referenciado no ponto 5.4, a lista dos estados limites para uma cortina de contenção de terrenos pode ser extensa. Uma *Soil Mixed Wall* difere das cortinas mais comuns a nível de técnicas construtivas e materiais, mas deve ser projetada para desempenhar o mesmo tipo de funções. Por essa razão, a discussão sobre os estados limites dos mecanismos de rotura acompanha de perto a dos estados limites estabelecidos pelo EC7 para as cortinas tradicionais.

Em situações de cortinas com colunas de solo-cimento sobrepostas num alinhamento, a resistência das colunas exigida deve verificar-se através da análise específica de tensões de rotura por corte (figura 5.17A) ou esmagamento devido ao efeito de arco (figura 5.17B). Deve ser analisado o equilíbrio entre as tensões laterais do solo e a resistência ao corte do solo-cimento determinada no banzo dos perfis metálicos e nos pontos mais estreitos da sobreposição como indicado na figura 5.17A. Quando o reforço metálico é feito em todas as colunas de solo-cimento, só a análise de corte é feita. Quando o reforço metálico é feito em colunas alternadas, além da análise de corte, é também verificada a capacidade compressiva do efeito de arco. A resistência à compressão no painel de colunas entre perfis, também é determinada (Jameson, 1996). Quanto aos perfis metálicos, a segurança deve ser verificada relativamente aos estados limites últimos de resistência associados aos esforços transversos e de flexão.



A – rotura por corte; B – Efeito de arco

**Figura 5.17 – Mecanismo de análise de tensões (adaptado Jameson, 1996)**

Relativamente à estabilidade global, deverá estudar-se o conjunto formado pela cortina e pelo maciço envolvente. A estabilidade global poderá ser posta em causa quando se desenvolve uma superfície de rotura ou deslizamento, em que, por exemplo, toda a massa de solo envolvente, incluindo a cortina, desliza ao longo dessa superfície. As propriedades resistentes do solo envolvente e da

cortina deverão ser apreendidas nesta análise, pois numa situação de perda de estabilidade global, as resistências ao corte do solo circundante e do solo-cimento, são ambas mobilizadas.

Se a cortina de solo-cimento for ancorada, a estabilidade global é condicionada pela posição das zonas de selagem das ancoragens. Os esforços nas ancoragens aumentam a resistência ao corte do solo entre a cortina e a zona de selagem de maneira que qualquer superfície de escorregamento só possa estar situada para além daquelas zonas. No entanto, este facto só é válido para o caso da resistência do solo ser de natureza essencialmente friccional; caso o maciço seja constituído por uma argila rija, por exemplo, os esforços nas ancoragens só produzem um aumento de resistência ao corte à medida que a consolidação ocorrer. Assim sendo, para solos coesivos, a análise da estabilidade é conduzida através de métodos convencionais, como Fellenius, Janbu ou Bishop. Neste caso, as zonas de selagem são localizadas para além da potencial superfície de deslizamento, procedendo-se à verificação de que as ancoragens asseguram o valor do coeficiente de segurança desejado na zona entre a cortina e a selagem (Matos Fernandes, 1983).

Quanto ao equilíbrio vertical da cortina, deve ser analisada a estabilidade relacionando a capacidade resistente do terreno e as forças verticais aplicadas à cortina. As forças verticais atuantes, tal como para uma cortina convencional, corresponderão ao peso próprio da cortina, às componentes verticais das forças aplicadas por eventuais ancoragens e às forças de atrito/adesão que se venham a estabelecer entre a cortina de solo-cimento e o solo.

Relativamente a esta última componente, nas cortinas SMW não existe qualquer plano de descontinuidades previamente estabelecido entre o solo e a cortina, pelo que existem melhores condições para se materializarem este tipo de forças de atrito/adesão. Pearlman e Himick (1993) in Jameson (1996) notaram que, devido à natureza *in situ* da construção das colunas, é desenvolvida uma adesão significativa em toda a superfície da cortina e assumem também uma ligação competente entre o solo-cimento e o perfil metálico.

Quanto às ancoragens, estas aplicam à cortina forças verticais importantes, de sentido descendente, podendo ocorrer problemas relacionados com movimentos verticais excessivos (Guerra, 2012). Se uma coluna assentar, a ancoragem pode sofrer movimentos rotacionais, causando deformações laterais.

A rotura rotacional pode acontecer quando, por exemplo, a profundidade de embebedimento da cortina não é suficiente. Este estado limite deve ser analisado por meio de cálculos envolvendo equações de equilíbrio, verificando a penetração da cortina no terreno para impedir essa rotura. Torna-se então importante que haja uma mobilização de forças de atrito na interface solo-cortina do lado passivo.

A cortina e os respetivos elementos estruturais, tais como ancoragens ou o próprio solo-cimento devem ser verificados no que respeita a roturas estruturais. A rotura estrutural ocorre quando alguma

parte da cortina ou seus elementos estruturais não suportam os carregamentos impostos, rompendo ou podendo originar grandes deslocamentos causando danos em estruturas adjacentes.

Durante a escavação, o solo é removido e a cortina previamente construída pode ser desgastada na face do interior da escavação até expor o banzo do perfil, caso este exista. Assim, ancoragens ou escoramentos são instalados diretamente no metal.

Quanto aos perfis metálicos, nas cortinas do tipo SMW não são necessários cuidados especiais para evitar fenómenos de encurvadura, como acontece nas cortinas tipo Berlim onde é habitual proceder-se ao enchimento de vazios com areia nas paredes dos furos para evitar esse fenómeno. Numa SMW, o perfil é introduzido na coluna antes do solo-cimento ganhar presa, ficando o perfil perfeitamente solidário com o solo-cimento.

Com a realização de escavações em meios urbanos, torna-se muito importante que se proceda a uma estimativa dos movimentos associados à escavação que se pretende estudar. Os movimentos devem ser verificados e poderão estar relacionados com a rigidez do sistema (Clough e O'Rourke (1990), in Rutherford (2004)).

## **5.6 Controlo de qualidade**

O controlo de qualidade desempenha um papel importante e necessário na construção de uma SMW. É necessário investigar se o desempenho da cortina é o esperado e verificar se os parâmetros de resistência e deformação pré-assumidos foram atingidos.

A figura 5.18 representa um fluxograma do processo de controlo de qualidade que pode ser dividido em várias partes: ensaios de laboratório; ensaios *in situ*; controlo durante a execução e verificação após construção.

Os ensaios de laboratório dizem respeito à avaliação de várias misturas, variando parâmetros como, por exemplo, as quantidades de ligante, a fim de se determinarem parâmetros de mistura ideais, como foi abordado no Capítulo 3. Além dos ensaios laboratoriais efetuados numa fase pré-construtiva em amostras criadas em laboratório, devem também ser feitos ensaios laboratoriais em amostras húmidas e em amostras obtida através de sondagem a várias profundidades da coluna após a construção (tabela 5.1). As amostras húmidas são colhidas logo após a construção da coluna e deixadas secar a uma temperatura prescrita, em moldes normalizados. Durante a execução, parâmetros como a pressão de injeção da calda, tempo de penetração vs profundidade, velocidade de rotação e quantidade de calda por metro de profundidade durante a penetração e a recuperação devem ser devidamente controlados através de sistemas que permitam ao operador controlar em tempo real, num monitor, todos esses parâmetros (EN 14679, 2005):

Rotação dos eixos durante a penetração e recuperação;

- Velocidade de penetração dos eixos;
- Quantidades de cimento, água e aditivos na mistura;
- Pressão de injeção de calda;
- Sobreposições das colunas;
- Alinhamento vertical e horizontal.

Durante a execução devem também ser registados os seguintes parâmetros:

- Referência ou número das colunas;
- Pressão de injeção de calda;
- Tipo de equipamento de mistura;
- Velocidade (mm/rot ou mm/min) de penetração e recuperação dos eixos;
- Tipo de ligante e composição da calda;
- Relação A/C;
- Quantidade de calda por metro de profundidade durante a penetração e a recuperação;

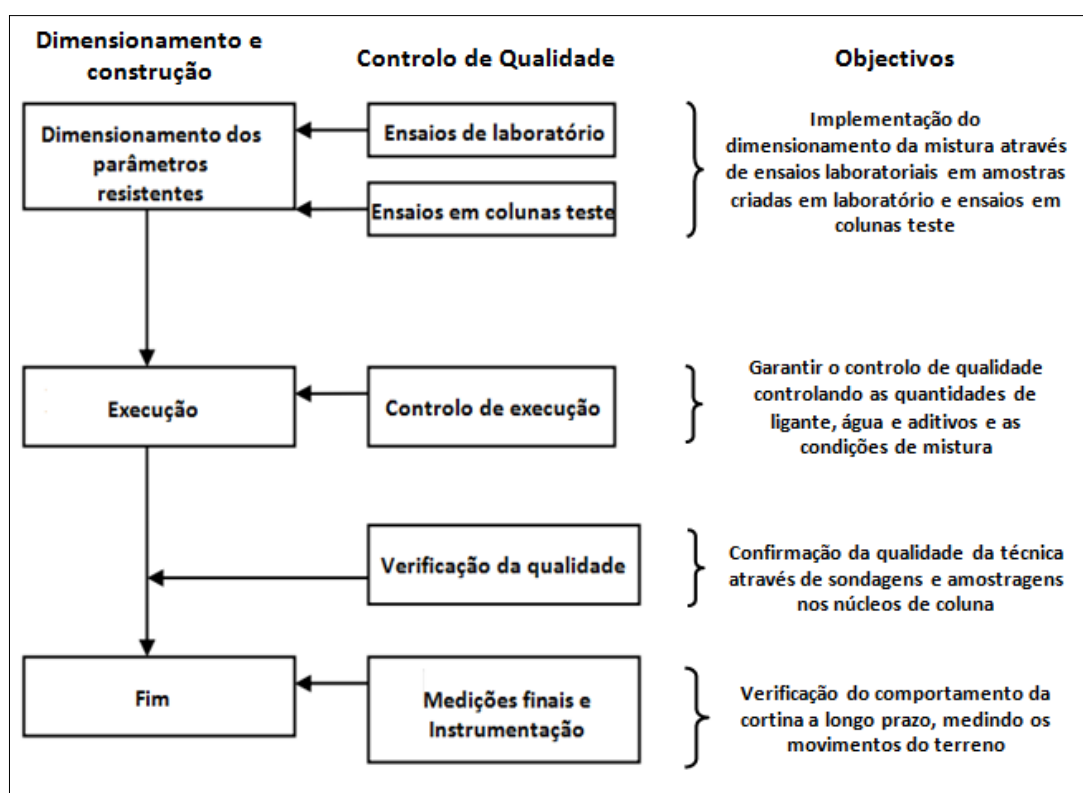


Figura 5.18 – Fluxograma do controlo de qualidade (adaptado de Larsson, 2005)

Tabela 5.1 – Principais ensaios laboratoriais para a verificação da qualidade (EN 14679, 2005)

Ensaio Laboratoriais	Observações
RCU e ensaio de corte direto	Obtêm-se as características resistentes. Os resultados podem ser bastante afetados pela presença de fissuras no provete.
Ensaio edométrico	Determina a compressibilidade da coluna.
Ensaio de permeabilidade	Permeâmetros. O coeficiente de permeabilidade pode também ser obtido através do ensaio edométrico.

Após a construção da cortina, também devem ser feitos ensaios *in situ* para a verificação da qualidade e desempenho das colunas, como recomendado pela EN 14679 (2005) (tabela 5.2). Alguns dos ensaios recomendados, são de execução corrente em Geotecnia. Referem-se, de seguida, apenas alguns específicos para o caso das colunas de solo-cimento:

- O Ensaio de Penetração em Colunas (*Column Penetration Test*) é realizado usando uma sonda, que é impelida ao longo da coluna, equipada com duas palhetas opostas, a uma velocidade de 20 mm/s, sendo registada a resistência à penetração.
- O Ensaio de Penetração Inversa em Colunas (*Reverse Penetration Test*) determina a uniformidade da coluna, e consiste na colocação de uma sonda com palhetas semelhantes às do ensaio anterior na base da coluna antes de ser construída. A sonda encontra-se ligada à superfície através de um cabo metálico. Após a construção da coluna faz-se atravessar a sonda por ela até à superfície a uma velocidade de 20 mm/s. Regista-se então a variabilidade da resistência ao longo da coluna aquando da recuperação da sonda (EN 14679, 2005).

Tabela 5.2 – Principais ensaios *in situ* para verificação da qualidade das colunas (EN 14679, 2005)

Ensaio <i>in situ</i>	Observações
Pressiómetro	Obtém-se a tensão de corte e compressibilidade das colunas.
Geofísica	Integridade da coluna e determinação indireta do módulo de deformabilidade e resistência.
CPT	Parâmetros resistentes e continuidade da coluna.
<i>Column Penetration Test</i> e <i>Reverse Penetration Test</i>	Resistência à penetração da sonda e variabilidade da resistência ao longo da coluna de solo-cimento.
Permeabilidade	Podem ser usados vários ensaios para se determinarem propriedades hidráulicas no campo, tal como com o “pressuro-permeâmetro”, que funciona como um pressiómetro e serve de base de determinação da permeabilidade da coluna em direções radiais. No entanto, não existe equipamento normalizado.

## 5.7 Observação

A observação de obras como as contenções de escavação através da instrumentação assume grande relevância devido à dificuldade da caracterização geotécnica a elas inerente e às incertezas que existem durante o projeto e execução. A monitorização permite não só acompanhar e controlar todo o processo de execução até à sua utilização, mas também identificar possíveis comportamentos da contenção que não estariam previstos em projeto. Os resultados obtidos da instrumentação permitem otimizar a solução ao longo da execução da obra. Sendo assim, a instrumentação e observação de estruturas de contenção e estruturas adjacentes constitui uma ferramenta indispensável para o controlo do risco da obra, podendo ainda contribuir para otimização do processo construtivo.

A observação inclui também a análise de parâmetros de longo prazo, que controlam a vida útil da contenção, avaliando as condições de segurança durante esse período e eventuais questões de reparação e manutenção. Se a contenção for provisória, o processo de monitorização deve limitar-se de uma forma exclusiva ao processo de escavação, por outro lado, para uma contenção definitiva, para além da observação e monitorização durante a fase de construção e escavação, deve também proceder-se à instalação de equipamentos de monitorização na estrutura definitiva. Deve então ser elaborado um plano de observação onde constem detalhadamente os métodos de observação e a sua frequência durante e após o processo construtivo, para recolha de valores de referência para acionamento de alertas técnicos e/ou planos de contingência. Deve também constar o procedimento a seguir quando surge alguma não-conformidade. De seguida, apresentam-se na tabela 5.3 alguns instrumentos que podem ser instalados numa obra de contenção e o seu objetivo.

**Tabela 5.3 – Exemplo de instrumentos para a observação da obra (Silva Gomes, 2010)**

<b>Tipo de instrumento</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Inclinómetros</b>	Permitem medir deslocamentos internos como a distorção angular entre dois pontos consecutivos de um furo e deslocamentos relativos de cada ponto. O tubo inclinométrico pode ser instalado no interior das colunas para medir deslocamentos no plano da contenção.
<b>Células de carga</b>	Permitem medir a variação da carga de pré-esforço em ancoragens
<b>Alvos topográficos</b>	Pontos de observação colocados acima da cota de escavação e lidos através de estações totais de precisão, controlando assim os deslocamentos verticais e horizontais. Permitem também medir convergências da estrutura de contenção
<b>Extensómetros</b>	O extensómetro mede deformações verticais e as deformações verticais e horizontais. Permite avaliar possíveis deformações nos perfis metálicos
<b>Piezómetros</b>	Monitorização de pressões intersticiais devido à descompressão dos terrenos aquando da escavação.
<b>Fissurómetros</b>	Monitorização de movimentos de juntas e fissuras
<b>Plataformas de assentamentos</b>	Assentamentos no terreno original.

## 6 Considerações finais

A técnica de melhoramento de solos *Deep Soil Mixing* possui uma grande versatilidade, fruto do desenvolvimento executivo em vários países, como o Japão, ao longo dos últimos anos. É aplicável a um grande leque de tipos de solos com o objetivo de melhorá-los, permitindo instalar infraestruturas em locais onde antes não era possível, resultando em melhorias a nível da resistência, da compressibilidade e da permeabilidade do solo.

Ao longo desta dissertação referiram-se as diferentes aplicações da técnica DSM, desde o reforço de fundações à mitigação da liquefação, evidenciando-se a sua aplicação às contenções de escavação.

Foram também abordados alguns aspetos técnicos da mistura de solos em profundidade, dando-se bastante ênfase às características das misturas entre o solo e o ligante, evidenciando-se o solo-cimento. Com base nos estudos (laboratoriais e *in situ*) de alguns autores, foi avaliada a influência da constituição do ligante no comportamento da mistura final. Foi realçado, por exemplo, que as melhorias das características mecânicas e de permeabilidade da mistura solo-ligante podem ser significativas em função das quantidades de cimento aplicadas.

Com o propósito de enquadrar a técnica DSM como solução de contenção de escavações, foram descritos, de uma forma geral, alguns dos métodos de contenção de escavações mais usados em Portugal, referindo as vantagens (e limitações) das soluções de cortinas de DSM. Mostrou-se que as cortinas DSM podem ser aplicadas a solos estratificados e heterogêneos e com presença de níveis freáticos. Para aumentar a capacidade resistente das cortinas DSM, as colunas podem ser reforçadas com elementos como perfis metálicos, os quais devem ser instalados nas colunas antes da mistura ganhar presa.

Do ponto de vista do dimensionamento deste tipo de cortinas, realçaram-se as semelhanças e principais diferenças face ao dimensionamento de cortinas executadas com base em soluções convencionais.

Como orientações para desenvolvimentos futuros incidentes neste tema, sugerem-se os seguintes conteúdos:

- Definição de metodologias que permitam otimizar o valor dos diâmetros e a distribuição das colunas mais adequados para cada situação;
- Análise de resultados de ensaios laboratoriais a um vasto leque de misturas solo-ligante, de modo a criar uma documentação do tipo base de dados, com referências às principais propriedades físicas e mecânicas das misturas;
- Realização de estudos numéricos que permitam a definição dos mecanismos de interação solo/colunas DSM associados a diferentes geometrias deste tipo de contenções.





## Bibliografia

AL-ZOUBI, M. S - Undrained Shear Strength and Swelling Characteristics of Cement Treated Soil. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 2, Nº. 1, 2008. p. 53-62.

ANDROMALOS, K; HEGAZY, Y; JASPERSE, B. – Stabilization of Soft Soils by Soil Mixing. Soft Ground Technology Conference, United Engineering Foundation and ASCE Geo-Institute, Noorwijkeront, Netherlands, 2000. p. 194-205.

AXELSSON, K; JOHANSSON, S.-E; ANDERSSON, R. - Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions. Feasibility study. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3, Linköping, Suécia, 2002. 51 p.

BAUER – Soil Mixing Wall System. BAUER Maschinen GmbH, Schrobenehausen, Germany, Product Information 2010. 12 p.

BRIAUD, J. L.; NICHOLSON, P.; LEE, J. – Behavior of Full-Scale VERT Wall in Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000.

BRUCE, D. A. – An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications. FHWA-RD-99-138. ECO Geosystems, LP. Pennsylvania, 2000. Vol I. 143p. (Technical report)

BRUCE, D. A., BRUCE, M.E.C. AND DIMILLIO, A.F. - Deep mixing methods: A global perspective. Geotechnical Special Publication Nº 81. Soil Improvement for Big Digs. Proc. Of sessions of congress 1998. Boston, Massachusetts, 1998. p. 1-26.

CHANG, Y. O. – Deep Excavation: theory and practice. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan. Taylor & Francis Group, London, 2006. ISBN-978-0-415-40330-6. 532p.

CHEW, S.H.; KAMRUZZAMAN, A.H.M.; LEE, F.H. – Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, Nº. 7, 2004. p. 696-706.

CHU, J.; VARAKSIN, S.; KLOTZ, U.; MENGÉ, P. – State of the art Report: Construction Processes. 17TH International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, ISSMGE, Alexandria Egypt, 2009. 134p.

CLOUGH, G.W.; O'ROURKE, T.D. – Construction Induced Movements of In-Situ Walls. ASCE, 1990, Geotechnical Special Publication N° 25, p. 439–470.

COELHO, S. – Tecnologia de fundações. 1ª ed. Amadora. Editora EPGE. 1996. ISBN-972-8326-22-X

CONSTRUIRONLINE – disponível em <http://construironline.dashofer.pt>; consultado em maio de 2012

CORREIA, A.A.S.; VENDA OLIVEIRA, P.J.; LEMOS, L.J.L. – Solo estabilizado pela técnica de deep mixing – Preparação Laboratorial de Amostras. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, 2008 Vol. III, p. 335-342.

CORREIA, A. A. S. – Aplicabilidade da técnica de Deep Mixing aos solos moles do Baixo Mondego. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011. 445 p. (dissertação de Doutoramento)

CRUZ, M. L. S. - Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento. Braga, Universidade do Minho, 2004. p. 212 (Dissertação de Mestrado)

DONALD, M. R.; ANDROMALOS, B. K.; FISHMAN, L. K. – A DSM wall for excavation support. Foundations and Ground Improvement , GSP 113, ASCE, Blacksburg, Virginia, 2001

E 263 Solo-cimento. Ensaio de molhagem-secagem. LNEC. Lisboa, 1972

EN 14679. – Execution of Special Geotechnical Works: Deep Mixing. CEN versão inglesa, Bruxelas, 2005. 52 p.

EN 197. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. CEN, 2000.

NP EN 1997-1. Norma Portuguesa; Eurocódigo 7 - Projecto Geotécnico; Parte 1: Regras gerais. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 179 pp. 2010.

Eades J.L., Grim R.E. 1966. – A quick test to determine lime requirements for soil stabilization, Highway Research Record, 139. 1996. p. 61-72.

ESSLER, R., KITAZUME, M. - Application of Ground Improvement: Deep Mixing (D3). TC 17, ISSMGE, 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. State of the Art Report: Construction Processes. Egypt, 2009.

EUROSOILSTAB - Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilization. CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177, Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, 2001. 94 p.

FHWA - Federal Highway Administration - Ground Improvement Technical Summaries., U.S. Department of Transportation, Working Draft, No. FHWA-SA-98-086, Vol. II., in press, 1998.

FHWA – Federal Highway Administration – disponível em <http://www.fhwa.dot.gov>; consultado em junho 2012.

FALK, E. E SIGMUD, C. – Deep mixing applications in Europe. International Symposium on DeepMixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 2009.

GUERRA, N. M. C. – Suporte teórico das aulas de Estruturas de Suporte, FCT-UNL. 2012.

HASSAN, M. – Engineering Characteristics of Cement Stabilized soft Finnish Clay. Helsinki University of Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil and Environmental Engineering, 2009. 72 p. (Tese de Licenciatura)

HILT, G.H. AND DAVIDSON, D.T. – Lime fixation in clayey soils. Bulletin No. 304, Highway Research Record, Washington, D.C., 1960. p. 20-32.

HITEC (Highway Innovate Technology Evaluation Center) – Evaluation of the Geo-Com VERT Wall System. CERF/IEEC Innovation Center. ASCE, USA, 2002.

HUAWEN, X. - Yielding and failure of cement treated soil. Singapura, National University of Singapore, 2009. 354 p. (tese de doutoramento)

IMA-Europe – disponível em <http://www.ima-europe.eu/>; consultado em Maio de 2012

JAMESON, ROBERT N. J. – Mechanical Properties of soil-cement and applications in excavation support. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1996. 476 p. (Tese de Mestrado)

JANZ, M.; JOHANSSON, S.-E. The function of different binding agents in deep stabilization, Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 9, Linköping, Suécia, 2002. 47 p.

KEMPFERT, H.; GEBRESELASSIE, B. – Excavations and Foundations in Soft Soils. Kassel, Alemanha: Springer-Verlag, 2006. 576 p. ISBN-10 540-32894-7

LARSSON, S. – Mixing processes for ground improvement by deep mixing. Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, 2003. (Tese de Douturamento)

LARSSON, S. – State of practice report - execution, monitoring and quality control. International Conference on Deep Mixing. Best Practice and Recent Advances. Deep Mixing '05, Stockholm, Sweden, 2005.

LASLEDJ A. E AL-MUKHTAR M. - Effect of Hydrated Lime on the Engineering Behaviour and the Microstructure of Highly Expansive Clay. The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 2008, India. p. 3590-3598

LNEC – Estruturas flexíveis para suporte de terras – Novos métodos de Dimensionamento. LNEC, Departamento de Geotecnia, Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais. Processo 55/13/1738, Lisboa, 1984. 445 p.

LOPES, P. N. P. - Execução de fundações profundas: A tecnologia Cutter Soil Mixing. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2010. 93 p. (Tese de mestrado)

LORENZO, G.A.; BERGADO, D.T. - Fundamental parameters of cement-admixed clay – new approach. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, Nº 10, 2004 p. 1042-1050.

MARTINS, J. G.; AGUIAR, M. A. – Estruturas: Contenção lateral de solos. Universidade Fernando Pessoa, Lisboa, 2005. 120p. (Monografia)

MASSARCH, K.R.; TOPOLNICKI, M. - Regional Report: European Practice of Soil Mixing Technology. Asia, Deep Mixing '05, International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Estocolmo, Suécia, 2005. 28p.

MATOS FERNANDES, M. A. – Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1983. 445 p. (Dissertação de Doutoramento)

MEIRELES, A. B.; MARTINS, J. G. – Fundações e contenção lateral de solos: Execução de cortinas de estacas. Universidade Fernando Pessoa, Lisboa, 2006. 72p. (Monografia)

MITCHELL, J.M., JARDINE, F.M. - A guide to ground treatment. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA). Publication C572, 2002.

MOSELEY, M. P.; KIRSCH, K. (Editores) – Ground Improvement, 2ª ed. OXON, UK: Spon Press, 2004. p. 331-428. ISBN0-203-57085-5

MUHUNTHAN, B.; SARIOSSEIRI, F. – Interpretation of Geotechnical Properties of Cement Treated Soils. Washington State University em cooperação com U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2008. 134 p.

PATRICIO, A.; TEIXEIRA, R. – Estruturas: Dimensionamento e execução de cortinas do tipo Berlim. Universidade Fernando Pessoa, Lisboa, 2006. (Monografia)

PEARLMAN, S. L.; HIMIK, D. E. – Anchored Excavations Support using SMW (Soil Mixed Wall). Deep Foundation Institute 18th Annual Member's Conference and Meeting. Pittsburgh, 1993.

PINTO, A. - Evolução e potencialidades das soluções de tratamento de terrenos recorrendo a tecnologias de solo-ligante em obras de fundações e de contenções. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, 2010. 41-44 p.

PINTO, A.; PEREIRA, A.; MATIAS, R.; PEIXOTO, A. – Soluções de Tratamento do Terreno de Fundação de Muros de Aterro na Auto-Estrada do Marão. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães (2010). p. 1393-1402

RETAININGWALL-SOLUTION – disponível em <http://www.retainingswall-solutions.com>; consultado em Julho de 2012.

RUTHERFORD, C. J. – Design Manual for Excavation Support Using Deep Mixing Technology. Texas: Texas A&M University, 2004. 255 p. (Tese de mestrado)

RUTHERFORD, C. J.; BISCONTI, G.; BRIAUD, J.L. –Design Manual of Deep Soil Mixed Walls for Excavation Support. Texas A&M University. Sponsored by the National Deep Mixing and the FHWA. Texas, 2005. 211p.

SHEETPILESPILING – disponível em <http://sheetpilespring.com>; consultado em Junho de 2012.

SIDDIQUE, A.; RAJBONGSHI B. - Mechanical properties of a cement stabilised coastal soil for use in road construction, Journal of Civil Engineering. The Institution of Engineers, Bangladesh, Volume 30, Nº 1, 2002. p. 51-67.

SILVA GOMES, A. – Suporte das aulas de Instrumentação e Melhoramento de Terrenos, FCT-UNL, 2010.

SOUZA, E. D. C. – A Técnica do Cutter Soil Mixing Aplicada a Escavações Urbanas: Aspectos Gerais e Caso de Estudo. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. p. 183 (Relatório de projecto)

TOWNSEND, F.C., ANDERSON, J.B. – A Compendium of Ground Modification Techniques. University of Florida in cooperation with the FHWA, 2004. 350p.

TREMBLAY, H., DUCHESNE, J., LOCAT, J AND LEROUEIL, S. - Influence of the nature of organic Compound on fine soil stabilization with cement. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, Nº.3, 2002. p. 535-546.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. Engineering and design-guidelines on ground improvement for structures and facilities. Technical Letter Nº 1110-1-185, Washington, DC, February, 1999

VAN IMPE, W. F. - Soil Improvement Techniques and Their Evolution. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1989. 125 p.

VARATOJO, P. – Sebenta de Fundações e Taludes G. FCT-UNL. Lisboa, 2005.

YANG, D.S. - Soil–Cement Walls for Excavation Support. Earth Retention Systems 2003: Conference presented by ASCE. The Deep Foundations Institute, and The International Association of Foundation Drilling, Nova York, EUA, 2003.